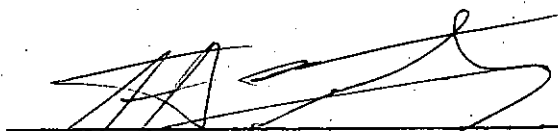




GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS PARA
ANÁLISE DE JUNTAS TUBULARES
DE ESTRUTURAS "OFFSHORE"

MÁRCIO FERREIRA ALENCAR

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVER
SIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS RE
QUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MES
TRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

Aprovada por:


Prof. AGUSTIN JUAN FERRANTE
Prof. EDISON CASTRO PRATES DE LIMA
Prof. NELSON FAVILLA EBECKEN
Prof. NEY AUGUSTO DUMONT

Alencar, Márcio Ferreira

Geração automática de dados para análise de juntas tubulares de estruturas "offshore". Rio de Janeiro, 1982.

viii, 212 p.

Tese - Univ. Federal do Rio de Janeiro

1. Geração automática de dados. 2. Juntas tubulares. 3. Plataformas marítimas. I. UFRJ. COPPE. II. Título.

624.1710285

A meus pais.

A Evelyn.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Agustin Juan Ferrante, pela orientação e constante incentivo.

A PETROBRÁS, por possibilitar a realização do mestrado, pelas facilidades computacionais e confecção gráfica do trabalho.

Aos colegas Valter Rocha dos Santos e César José Moraes Del Vecchio, pelo apoio e incentivo recebidos.

A Fani Knoploch, pela prestimosa revisão, e a Sonia Maria Seabra, pelo dedicado trabalho datilográfico.

RESUMO

A determinação das tensões localizadas atuantes nas juntas tubulares de estruturas *offshore* é de grande importância e interesse. O Método dos Elementos Finitos é utilizado para a análise das tensões. Entretanto, devido à relativa complexidade geométrica do problema, a geração não-automatizada da malha de elementos é extremamente árdua e sujeita a erros. Os esquemas utilizados para a geração automática são restritos e apresentam várias limitações geométricas, tratando apenas juntas planas.

Um novo procedimento especializado de geração automática por computador é apresentado.

As malhas são geradas para juntas completas, conforme ocorrem na situação real das plataformas, não se restringindo a tipos-padrão, nem a configurações planas.

O grau de refinamento da malha é completamente variável, sendo definido pelo usuário.

ABSTRACT

The evaluation of localized stress in offshore structure tubular joints is of great importance and interest. The Finite Element Method is used to stress analysis but the non-automatic mesh generation of relatively complex configurations is extremely hard and subject to errors. The automatic generation approaches in use have geometric limitations and deal only with plane joints.

A new specialized automatic mesh generation approach by computer is presented.

It is neither restricted to standard joint types nor to plane configurations. The meshes are generated for real joints.

The user especificies the refinement degree which is completely variable.

INDICE

| | |
|---|--------|
| I - INTRODUÇÃO | |
| I.1 - Juntas Tubulares de Estruturas "Offshore"..... | 1-7 |
| I.2 - Concentração de Tensões em Juntas Tubulares..... | 8-15 |
| I.3 - Aspectos Brasileiros na Área "Offshore"..... | 16-18 |
| I.4 - O Plano da Tese..... | 19-22 |
| II - MALHAS PARA ANÁLISE DE JUNTAS TUBULARES | |
| II.1 - Considerações Gerais..... | 23-26 |
| II.2 - Características da Malha de Elementos Finitos.... | 26-34 |
| II.3 - Desenvolvimentos Anteriores..... | 34-39 |
| III - O NOVO PROCEDIMENTO DE GERAÇÃO APLICADO A JUNTAS TUBULARES | |
| III.1 - Características Gerais do Procedimento..... | 40-46 |
| III.2 - Determinação das Interseções..... | 46-51 |
| III.3 - Geração dos Pontos | |
| III.3.1 - Esquema Básico..... | 51-57 |
| III.3.2 - Dimensão dos Quadrados..... | 57-60 |
| III.3.3 - Gradação da Malha..... | 60-63 |
| III.3.4 - Procedimento para Ponto Próximo..... | 63-68 |
| III.3.5 - Tubos Secundários..... | 68-70 |
| III.4 - Triangularização da Malha..... | 70-74 |
| III.5 - Regularização e Avaliação das Malhas Geradas Automaticamente..... | 74-78 |
| III.6 - Aspectos Computacionais. Estrutura de Dados..... | 79-84 |
| IV - MANUAL DO USUÁRIO DO PROGRAMA "GEMAT" | |
| IV.1 - Introdução..... | 85-88 |
| IV.2 - Dados de Entrada..... | 88-104 |

| | |
|---|---------|
| IV.3 - Descrição dos Resultados..... | 104-108 |
| IV.4 - Exemplos de Aplicações Práticas do Programa.... | 109-157 |
| V - ANÁLISE DE MALHAS OBTIDAS COM O GERADOR AUTOMÁTICO... | 158-187 |
| VI - CONCLUSÕES..... | 188-195 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 196-199 |
| APÊNDICE I | |
| TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS..... | 200-206 |
| APÊNDICE II | |
| DETERMINAÇÃO DAS INTERSEÇÕES..... | 207-212 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 - JUNTAS TUBULARES DE ESTRUTURAS "OFFSHORE"

A interseção de superfícies cilíndricas ocorre em diversas situações de Engenharia, tais como em vasos de pressão, em redes de tubulação e, em particular, em estruturas metálicas compostas por membros tubulares. Nestas estruturas a junção de dois ou mais membros constitui uma junta tubular.

Considerando-se aspectos localizados, entende-se como junta tubular a região circunvizinha à ligação, estruturalmente afetada pela interseção. Abrange, portanto, o trecho vizinho à junção de cada tubo envolvido.

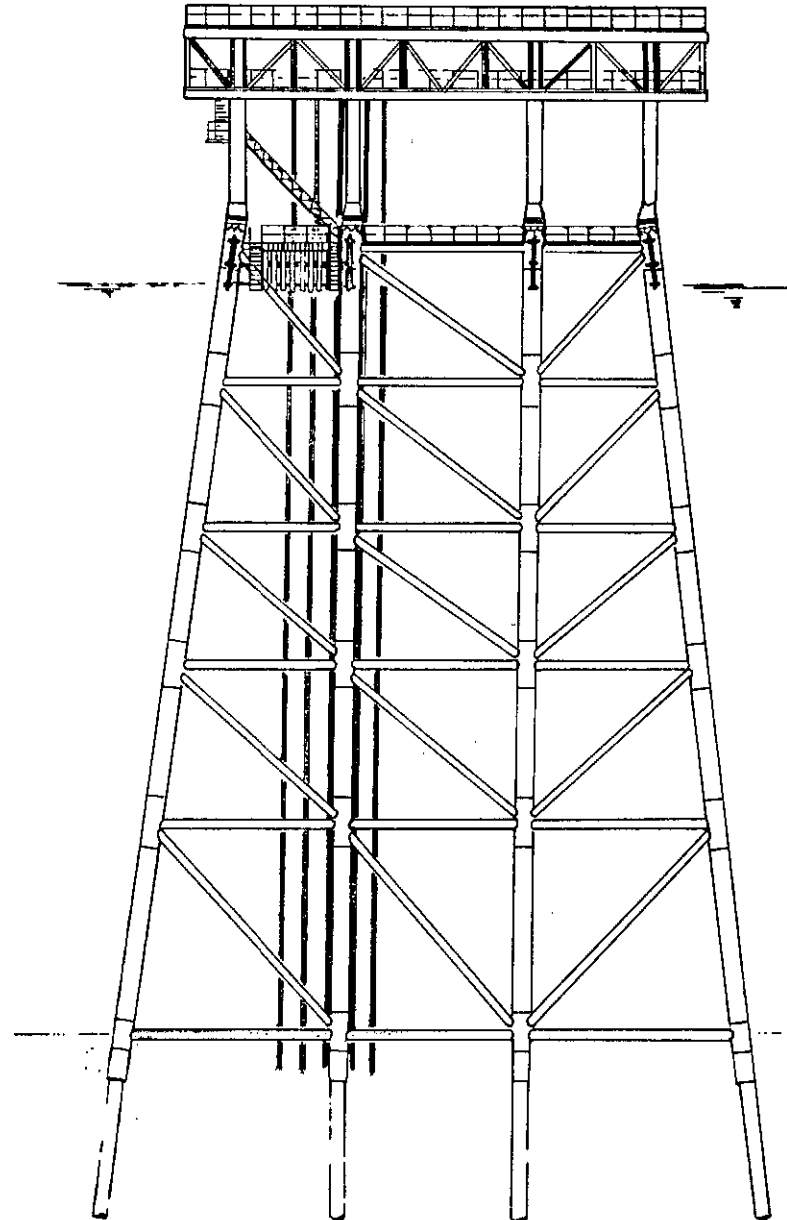
Estruturas tubulares são utilizadas com freqüência. São extensivamente empregadas na indústria do petróleo em instalações e equipamentos marítimos, tais como em plataformas de perfuração e de produção. A utilização de elementos estruturais cilíndricos nas plataformas é vantajosa pela não-direcionalidade das propriedades da seção transversal e por suas características hidrodinâmicas, aspectos importantes devido à natureza das cargas ambientais atuantes. Outra vantagem de seu emprego é o auxílio na obtenção e controle da flutuabilidade da estrutura, necessária em certas situações de transporte, lan

çamento e verticalização de plataformas de produção.

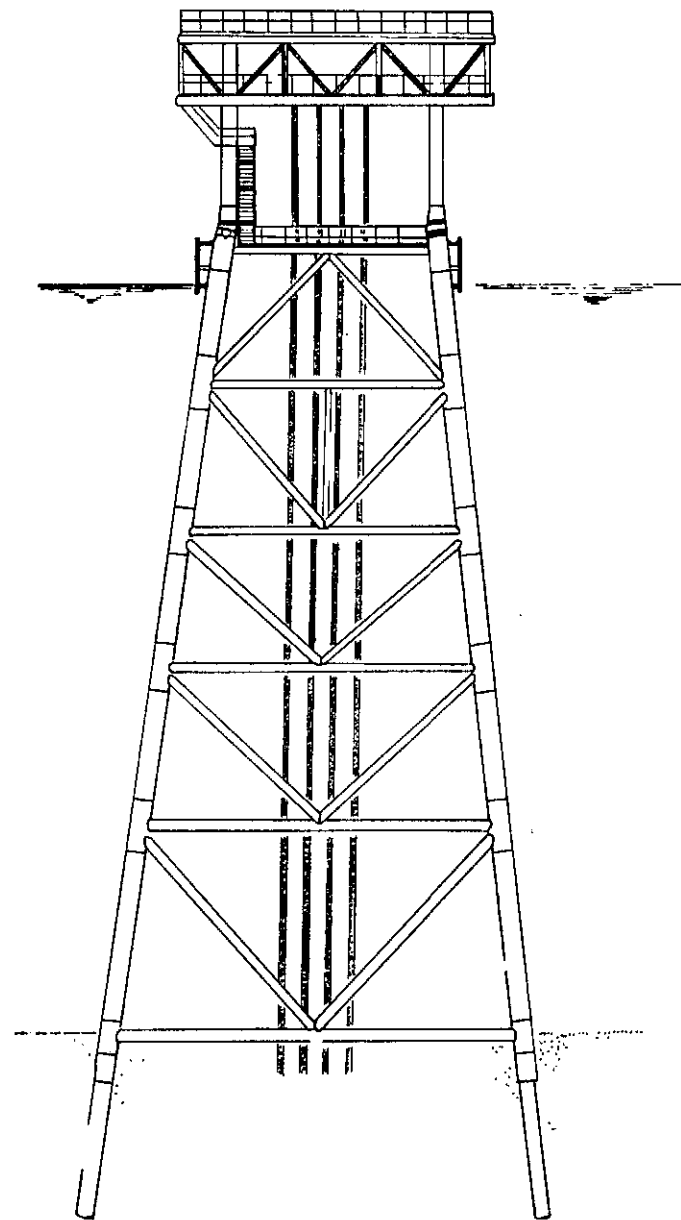
As plataformas de produção mais difundidas são do tipo jaqueta metálica. São constituídas por um conjunto estrutural superior, correspondendo aos conveses, onde são instalados os equipamentos de produção, utilidades, equipamentos de apoio e de serviço. Esta estrutura é normalmente sustentada por uma fundação de estacas cravadas no solo marinho ou cimentadas em furos pré-perfurados. O contraventamento das estacas é realizado pela jaqueta, estrutura tubular treliçada, onde as juntas assumem grande importância e responsabilidade.

A figura I.1 apresenta um exemplo de plataforma do tipo jaqueta. As estacas passam através das pernas principais ou através de guias externas específicas. No primeiro caso a conexão entre a estaca e a perna é feita normalmente através de soldagem da estaca no topo da perna. Pode-se realizar uma ligação adicional através de cimentação do espaço anular que, além de outras vantagens, melhora o mecanismo de transferência de cargas e fornece algum reforço para as juntas tubulares das pernas.

O conhecimento em detalhe do comportamento estrutural das juntas é de grande interesse e atualidade. Viabilizadas economicamente pela crise energética, as atividades de perfuração e produção dirigem-se para maiores lâminas d'água, levando a estruturas de maior porte, sujeitas a maiores cargas, a efeitos preponderantes de amplificação dinâmica e a maiores solicitações de fadiga.



VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL

FIG.I.1 - PLATAFORMA TIPO JAQUETA

Assiste-se na atualidade a um esforço mundial da comunidade tecno-científica em pesquisa, desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias relativas a estruturas *offshore*. O estudo das juntas tubulares e, especificamente, a determinação das tensões localizadas e dos fatores de concentração de tensões são importantes para o projeto e essenciais para diversas aplicações e estudos.

As juntas tubulares típicas das jaquetas são constituídas por um tubo principal, de maior diâmetro, em cuja superfície são soldados os tubos secundários. A extremidade do tubo secundário é preparada de forma a acoplar na superfície do tubo principal, conhecida por "boca-de-lobo". A superfície do tubo principal normalmente não é vazada.

Dependendo das características topológicas da estrutura, as juntas podem apresentar grande complexidade geométrica. Podem ter superposição de membros secundários e, em função das tensões atuantes, podem ter ainda reforços enrijecedores. Exemplos de juntas tubulares são mostrados na figura I.2.

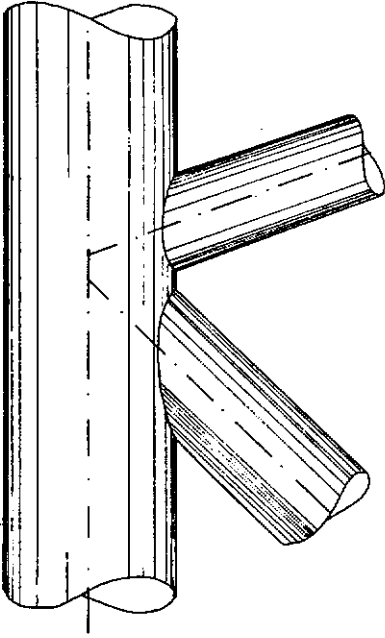
Os eixos dos membros secundários normalmente interceptam o eixo do tubo principal em um único ponto. Quando isto não ocorre, a junção é dita excêntrica. A excentricidade pode ser positiva, no caso de afastamento dos tubos, ou negativa, quando há uma superposição. Nas juntas com superposição os tubos secundários se interferem e uma parcela dos esforços é transmitida diretamente de um tubo secundário para outro. Limites de espaçamentos, recomendações e detalhes constam de di

versas normas e códigos relativos aos projetos de plataformas *offshore*, tais como API RP 2A ⁽¹⁾, DNV ⁽²⁾ e AWS D1.1 ⁽³⁾.

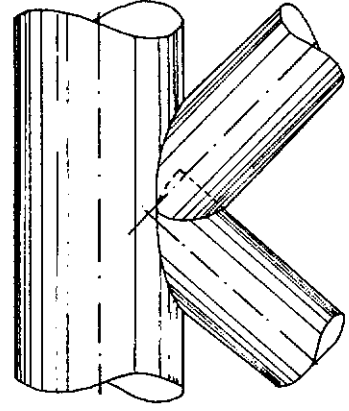
Os reforços podem ser internos (diafragmas) ou externos (anéis ou chapas longitudinais). Os tubos que compõem a junta podem ter na região próxima à junção maiores espessuras ou utilizar materiais de melhores propriedades.

Para orientação dos estudos e aplicação de procedimentos, é prática usual distinguir nas juntas tubulares reais configurações típicas, tais como "T", "Y" e "K". São configurações ditas planas, uma vez que os eixos de todos os tubos que formam a junta estão contidos em um único plano, o plano da junta.

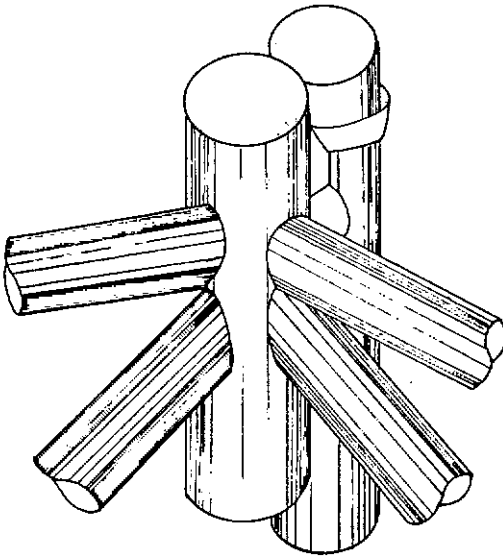
Quanto à fabricação, as juntas podem ser formadas pela montagem e soldagem direta dos tubos ou ser pré-fabricadas e soldadas posteriormente aos membros da estrutura. Na pré-fabricação têm-se melhores condições de fabricação e inspeção. Pesquisas vêm sendo realizadas visando desenvolver tecnologia para fabricação e emprego de juntas fundidas. Permitindo moldagem da interseção e variações na espessura, possibilitam melhor conformação geométrica, otimização na coloca-ção de material e, conseqüentemente, menores níveis de concentração de tensões.



JUNTA SIMPLES



JUNTA COM SUPERPOSIÇÃO



JUNTA COMPLEXA

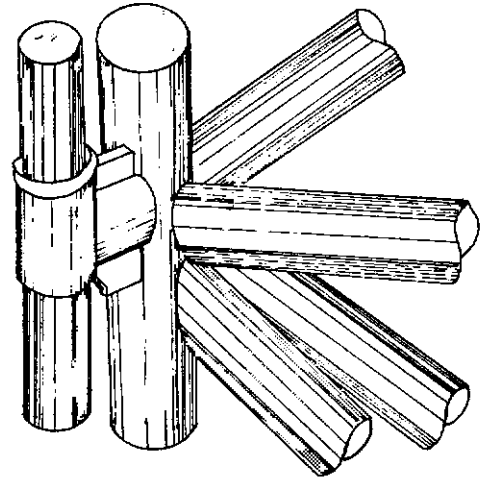
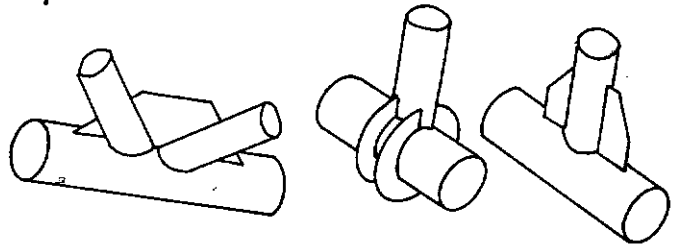
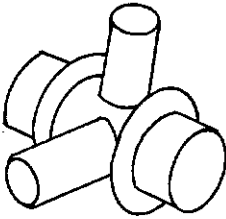
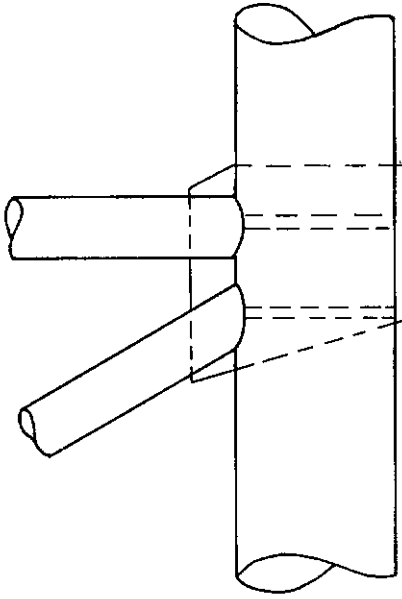


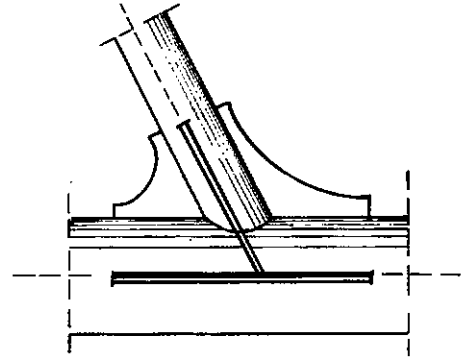
FIG. I.2 — JUNTAS TUBULARES



JUNTAS COM REFORÇOS



REFORÇO INTERNO



REFORÇO EM DUAS DIREÇÕES

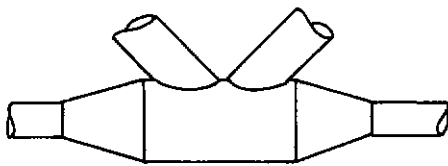
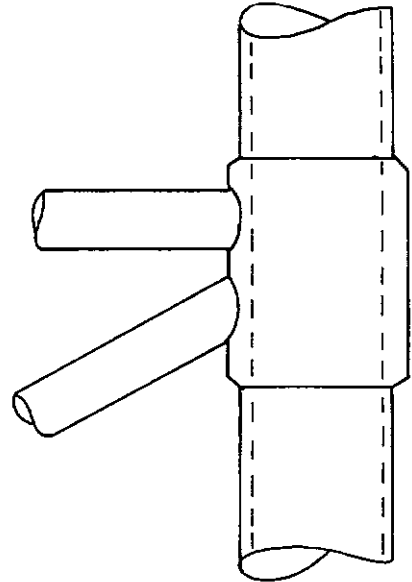
JUNTA COM AUMENTO
DE DIÂMETROJUNTA COM AUMENTO
DE ESPESSURA

FIG. I.2 - (CONTINUAÇÃO)

I.2 - CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM JUNTAS TUBULARES

Nas plataformas *offshore*, as solicitações de ondas e correntes atuam diretamente sobre os membros da jaqueta. Os esforços produzidos nos membros de contraventamento são transferidos para as pernas e daí para as estacas. Esta transferência de esforços é realizada através das juntas tubulares.

Membros tubulares são susceptíveis a cargas locais com componentes perpendiculares à sua superfície, tornando as juntas os pontos mais críticos da jaqueta.

A configuração geométrica é de importante consideração no projeto, uma vez que deve minimizar o efeito de momentos secundários e os aumentos localizados de tensões, visando realizar a transferência de esforços tão eficientemente quanto possível. Mesmo assim, devido a mudanças abruptas na geometria, concentrações de tensões ocorrem no entorno da interseção. Esta amplificação da tensão nominal dos membros deve ser atribuída ao desbalanceamento na rigidez axial do tubo secundário e na rigidez radial do tubo principal.

Além da análise estática do problema, aspectos relativos à fadiga devem também ser considerados, devido à natureza cíclica dos esforços de ondas. Trincas de fadiga iniciam-se nos locais de maiores tensões, tornando novamente as juntas tubulares os pontos críticos da estrutura. Assim a fadiga é considerada como um fenômeno localizado, e a determinação do

fator de concentração de tensões é básica para o cálculo da vida à fadiga das juntas. Para este cálculo utiliza-se o conceito de dano acumulado, e na determinação do número de ciclos para a falha, para cada faixa de tensões, empregam-se as curvas "S-N", onde as tensões nominais devem estar afetadas pelo fator de concentração de tensões, conforme API RP 2A (1).

Outra aplicação em que é necessária a determinação do fator de concentração de tensões atuante nas juntas diz respeito às inspeções em serviço das estruturas. A inspeção periódica das plataformas instaladas é prescrita e regida por normas das entidades classificadoras internacionais, tais como as da DNV (2). Tratando-se de trabalhos submarinos, as inspeções envolvem altos custos, exigindo grandes recursos de pessoal, barcos de apoio e outros equipamentos sofisticados, crescendo bastante com o aumento da lâmina d'água. Não é factível, portanto, inspecionar detalhadamente todas as juntas de uma jaqueta de grande porte, mesmo em um programa de longo prazo. Conforme orientações das normas, no planejamento dos programas de inspeção periódica identificam-se as juntas consideradas críticas da estrutura em questão. Inspeccionam-se com maior detalhe apenas estas juntas, dentro ainda de uma escala de prioridades e frequência.

Na identificação das juntas críticas para a inspeção, são analisados aspectos de projeto, fabricação, instalação, montagem e ocorrências com a estrutura em uso, além de resultados de inspeções anteriores. Para identificar as juntas

críticas por projeto, é básica a determinação do fator de concentração de tensões.

A determinação das tensões localizadas nas juntas é também necessária na realização de pesquisas, estudos e desenvolvimento de novas tecnologias envolvendo as juntas tubulares. Estudos de critérios de fadiga, trabalhos de medição experimental de tensões, monitoragem por emissão acústica e desenvolvimento de nós fundidos, por exemplo, estão no momento sendo realizados em âmbito internacional.

A realização de estudos das tensões localizadas atuantes nas juntas tubulares através de técnicas analíticas é extremamente difícil. Tem-se um comportamento teórico de casca fina associado a uma configuração geométrica de relativa complexidade. De acordo com LEICK & POTVIN ⁽⁴⁾ e RODABAUGH ⁽⁵⁾, apresenta-se o desenvolvimento histórico descrito a seguir.

Tentativas preliminares de análise foram feitas através de um enfoque de Resistência dos Materiais, como no método *Punching Shear*, identificado na literatura estrangeira como API RP 2A ⁽¹⁾ e CARTER *et alii* ⁽⁶⁾.

A consideração básica deste método é que os esforços do membro secundário são transferidos através de tensões cisalhantes, atuando ao longo da espessura da parede do tubo principal. Resultados experimentais de resistência última de juntas, com o membro secundário em posição perpendicular e sendo tracionado, não se afastam muito da resposta teórica. O tipo

de comportamento admitido é plausível principalmente para pequenos diâmetros do tubo secundário em relação ao diâmetro do principal. Entretanto, o método não considera o comportamento de membrana e de flexão das cascas, nem a variação de tensões ao longo da linha da interseção.

Tratamento um pouco diferente foi desenvolvido pela companhia KELLOGG. Além de outras limitações, desconsidera, assim como o método *Punching Shear*, a interação de rigidez entre os tubos. A rigidez do tubo secundário tende a restringir as deformações da superfície do principal na região da interseção, e esta interação é importante.

Ao longo da década de sessenta, diversos esforços foram feitos em busca de uma solução mais rigorosa para o problema através da Teoria da Elasticidade. De maneira geral, os resultados sô foram válidos para ângulos próximos de 90^0 e para pequenas relações de diâmetro do tubo secundário para o diâmetro do tubo principal. Estas limitações devem ser atribuídas ã desconsideração da componente da carga do tubo secundário na direção tangencial ao tubo principal. Os desenvolvimentos realizados limitaram-se às geometrias mais simples e não modelavam completamente a conectividade dos tubos. As teorias eram complicadas, envolvendo equações diferenciais e superposição de séries de Fourier, de tal maneira que tentativas de utilização prática através de computador apresentaram graves problemas de convergência. Muitas das teorias diziam respeito a bocais de vasos de pressão, onde o problema é similar. Nas

juntas tubulares, entretanto, a superfície do tubo principal não é vazada, apresentando sensível diferença de rigidez exatamente na região junto à interseção, onde são maiores os gradientes de tensão.

Com o desenvolvimento do método dos Elementos Finitos, possibilitando a modelagem de geometrias complexas, foram feitas aplicações para juntas tubulares. Devido à complexidade da geometria das interseções, é necessário um grande número de elementos para representar corretamente o gradiente de tensões, levando a uma demanda computacional excessiva. Este problema foi sanado com o surgimento dos computadores de terceira geração, com grande capacidade de memória central e rapidez de processamento. Outro obstáculo residia no próprio elemento finito para modelagem de cascas finas de geometria arbitrária, solucionado com o desenvolvimento de elementos apropriados.

Várias investigações foram efetuadas com utilização do Método dos Elementos Finitos, e, de modo geral, os resultados obtidos concordam com medições experimentais. O esforço computacional, entretanto, é razoável e, juntamente com o alto custo do tempo de engenharia necessário à preparação não-automatizada da malha de elementos finitos, constitui até o momento fator limitante ao emprego do método como rotina de projeto.

Critérios de projeto de juntas tubulares contidos em códigos e normas não são completos. A norma API RP 2A (1),

até recentemente (1979), só indicava como critério de análise o método *Punching Shear*. Diversos aspectos do problema não são tratados nas especificações vigentes, e procedimentos a adequados para projeto ainda estão por ser totalmente fixados.

Visando atender esta necessidade, vários trabalhos foram realizados com o objetivo de determinar a concentração de tensões através do estabelecimento de equações semi-empíricas que correlacionassem os diversos parâmetros geométricos das juntas. Entre os resultados obtidos, as equações devidas a KUANG *et alii* ⁽⁷⁾ vêm tendo maior difusão, citadas atualmente na norma API RP 2A ⁽¹⁾. Foram desenvolvidas com base em resultados analíticos de elementos finitos para os casos de carregamento axial, momento fletor no plano da junta e no plano transversal. Estudos posteriores, com o de GIBSTEIN ⁽⁸⁾, foram realizados sobre as equações estabelecidas. Aprimoramentos foram introduzidos, como novos parâmetros e fatores de correção advindos de comparação com resultados experimentais. De modo geral, a comparação com medições experimentais indica variações dentro de limites de 20%, o que é considerado como uma boa concordância para o problema.

O procedimento não indica a localização dos pontos de maiores tensões e as equações são aplicáveis com certa segurança somente dentro de determinados limites mais usuais de relações de parâmetros geométricos, considerados em seu estabelecimento. São são tratadas configurações planas típicas, como algumas das indicadas na figura I.3. A análise é feita

separadamente por solicitação e por configuração, não sendo a junta real analisada como um todo. Cada configuração não considera a presença dos demais tubos.

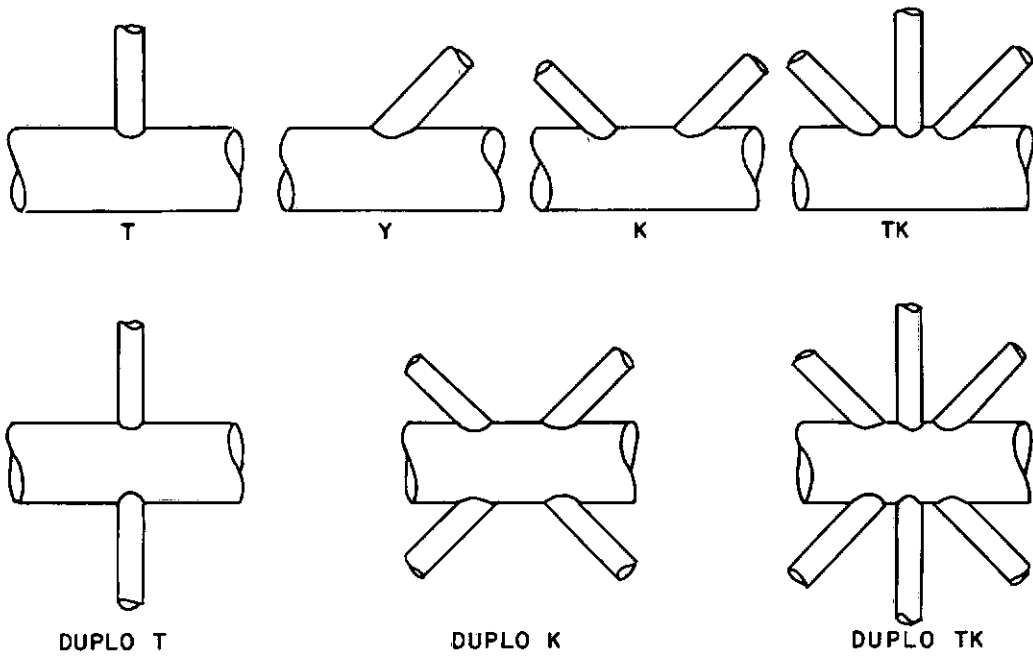


FIG.I.3 — CONFIGURAÇÕES PLANAS TÍPICAS DE JUNTAS

Não obstante, é o que de melhor se dispõe como ferramenta prática de projeto. O emprego das equações é válido como primeira aproximação e, em casos críticos ou de maior responsabilidade ou quando se necessita de resultados mais rigorosos e completos, deve ser feita uma análise por elementos finitos.

O fator de concentração de tensão é a relação entre a tensão máxima atuante no tubo em questão, principal ou secun-

dário e a tensão nominal do tubo secundário. Algumas considerações, entretanto, devem ser citadas. Conforme RODABAUGH ⁽⁵⁾, definições de tensão ou deformação máxima não são dadas com precisão nos códigos e normas. Conclui-se, de vários trabalhos publicados, que a concentração de tensões em questão é de origem geométrica, decorrente da configuração global da junta. Não se consideram, portanto, tensões máximas devidas a descontinuidades geométricas na raiz do cordão de solda. Com este enfoque, a tensão localizada pode ser medida por *strain gage* e calculada por meio de elementos finitos, não se incluindo na modelagem o cordão de solda ou malha de elementos excessivamente refinada.

Conforme GIBSTEIN ⁽⁹⁾, a definição do ponto de tensão máxima e a análise de tensões têm que estar associadas à maneira pela qual as curvas "S-N" utilizadas para o cálculo da vida à fadiga foram desenvolvidas e estabelecidas. Definições difusas podem provocar erros e dificultam comparações de resultados. Um erro de 18% na tensão pode conduzir a erros de 100% na previsão da vida à fadiga. É preciso estabelecer uma definição internacional para o fator de concentração de tensões para juntas tubulares, incluindo procedimentos de medição. A não-consideração das tensões resultantes da presença do cordão de solda em trabalhos experimentais pode ser garantida baseando-se nos resultados de análises efetuadas na "École Polytechnique", na França, e em medições na "DNV". Tais estudos concluíram que o efeito do cordão não se estende além de 4 mm.

I.3 - ASPECTOS BRASILEIROS NA ÁREA "OFFSHORE"

Com a crise energética e a escalada de preços do petróleo no mercado internacional, o Brasil, um dos grandes importadores mundiais, adotou uma série de medidas visando a redução de sua dependência externa de energia, incluindo sensível aumento do esforço exploratório de hidrocarbonetos. De acordo com o Engº Maurício Medeiros de Alvarenga ⁽¹⁰⁾, Superintendente-Geral do Departamento de Produção da PETROBRÁS, a Companhia investiu em exploração e produção em 1981 cerca de US\$2,6 bilhões, correspondendo a 88% de seus investimentos diretos.

Ao final da década de 60, as expectativas de descobertas significativas em áreas terrestres eram bastante limitadas, e a PETROBRÁS, conforme a tendência mundial de exploração no mar, iniciou atividades nas bacias sedimentares da plataforma submarina brasileira. Após treze anos de trabalhos, foram perfurados em torno de 600 poços, identificando-se cerca de 20 campos petrolíferos ao longo do litoral. Foram localizados aproximadamente 968 milhões de barris, sendo 80% na Bacia de Campos, onde novas descobertas são esperadas.

Dados de previsão preliminar de investimentos da PETROBRÁS em exploração e produção no quinquênio 1981/1985 indicam o montante de US\$15 bilhões. São produzidos no momento cerca de 280.000 barris por dia, correspondendo a 28% do consumo nacional. A meta para 1985 é de 500.000 barris por dia, 50% do consumo previsto de petróleo. O aumento estimado

de consumo de 500.000 barris por dia seria suprido por outras fontes energéticas. Para esta meta, as reservas atuais já possibilitam a obtenção de uma produção de 400.000 barris por dia.

Têm-se no momento 32 plataformas de produção instaladas e, além das plataformas da Bacia de Campos em fabricação e instalação, será necessária a construção de 40 a 50 plataformas para a produção esperada.

Depreende-se do exposto que as atividades *offshore*, em particular as plataformas e demais estruturas marítimas, continuarão em desenvolvimento no País e crescerão mais ainda em demanda e importância.

Das áreas marítimas atuais, destaca-se a Bacia de Campos, que contará com sete plataformas fixas de grande porte, semelhantes às do Mar do Norte. A lâmina d'água é superior a 100 metros, e avançadas tecnologias em termos mundiais estão sendo empregadas.

As atividades petrolíferas *offshore* atingiram tamanho grau de desenvolvimento, que levaram ao limite da técnica conhecida e experimentada. Em diversas situações não se dispõe de procedimentos de engenharia completamente estabelecidos, e lamentáveis acidentes têm ocorrido. Pesquisas e desenvolvimentos são necessários, e o Brasil deve capacitar-se tecnicamente, ainda porque as respostas para os problemas nacionais

podem não existir mesmo no exterior. Como exemplo, têm-se os recentes problemas estruturais envolvendo o sistema provisório de produção do campo de Garoupa, onde a técnica estrangeira não foi bem sucedida. O mar de Campos não se apresenta a princípio tão hostil quanto o mar do Norte, mas tem-se revelado bastante crítico quanto à fadiga das estruturas.

A PETROBRÁS tem incentivado a participação de entidades e firmas nacionais na área *offshore* e, de modo geral, vem encontrando resposta. Quanto à realização de estudos e desenvolvimentos, a COPPE e o IPT têm-se destacado, inclusive com trabalhos relativos a juntas tubulares. A COPPE, em particular através do programa de Engenharia Civil, vem prestando intensa consultoria técnica, desenvolvendo, modificando e aprimorando sistemas computacionais para análise de plataformas, organizando simpósios e seminários e estabelecendo cursos *offshore* a nível de mestrado e de doutorado. Este trabalho de tese, que não é o primeiro especificamente na área *offshore* na COPPE, posiciona-se dentro do espírito de desenvolvimento brasileiro de tecnologia própria.

A respeito de juntas tubulares, a COPPE realizou análise de tensões por elementos finitos em junta de plataforma instalada no litoral sul da Bahia, e o IPT fará medições de campo em junta de plataforma do Campo de Curimã. O Centro de Pesquisas da PETROBRÁS desenvolve estudos relativos à concentração de tensões, e estão programadas pesquisas em fadiga e em desenvolvimento de juntas utilizando material fundido. A cooperação entre as entidades é sempre conveniente e necessária.

I.4 - O PLANO DA TESE

O presente trabalho objetivou desenvolver e implementar em computador um procedimento de geração automática de malhas de elementos finitos especializado para juntas tubulares de estruturas *offshore*. Tais malhas destinam-se à aplicação do Método dos Elementos Finitos na determinação das tensões localizadas e dos fatores de concentração de tensões de origem geométrica.

Atualmente, a aplicação do Método dos Elementos Finitos para a análise de juntas tubulares não apresenta em si maiores dificuldades. A grande limitação a seu emprego reside na necessidade de discretização prévia do domínio através de uma malha de elementos finitos com características adequadas de gradação e de refinamento. Devido à complexidade geométrica das juntas tubulares, a geração não-automatizada é tarefa árdua e de extrema dificuldade, mesmo para as juntas mais simples. Em juntas com maior número de membros e em várias direções, a geração é quase inviável na prática. VISSER ⁽¹¹⁾ cita que, para uma junta de complexidade média, a preparação de uma malha de 300 elementos consumiu o equivalente a 10 homens-dia de trabalho.

De acordo com dados de literatura, tais como LEICK & POTVIN ⁽⁴⁾ e GRESTE ⁽¹²⁾, procedimentos específicos de geração automática de malhas para juntas tubulares vêm sendo desenvolvidos. Tais procedimentos e respectivas implementações computacionais, além de não estarem a princípio disponíveis

para utilização por terceiros, apresentam diversas limitações. Em geral consideram apenas tipos-padrão de juntas planas, tais como "T", "K" e "Y". Fixam limites para os valores de ângulos entre os tubos, para relações de diâmetros e, no caso de junta "K", para o espaçamento entre os tubos secundários.

Como as juntas devem ser planas e raramente isto ocorre na situação real de uma plataforma *offshore*, a análise é feita por partes. Não se considera, portanto, a interferência ou mesmo a presença dos tubos cujas linhas de centro não estão contidas no plano sob estudo. Além destas aproximações, tem-se também um grande esforço computacional, uma vez que cada junta é subdividida em vários casos de geração da malha e análise de tensões, com posterior composição dos resultados.

Neste trabalho de tese, a abordagem do problema é feita de maneira geral e global, sendo considerada sua característica tridimensional, e não apenas o caso de juntas planas. As juntas são tratadas de maneira completa, conforme ocorrem na situação real. Limitações geométricas de ângulos, de relações de diâmetros e de espaçamentos não são introduzidas.

O procedimento de geração automática da malha foi desenvolvido a princípio para juntas sem superposição e sem reforços adicionais.

Objetivou-se a geração de malhas de elementos finitos

triangulares planos, de modo a utilizar na triangularização dos pontos o eficiente procedimento proposto por NELSON (13).

Como o objetivo é a determinação das tensões de origem geométrica, o cordão de solda na ligação entre os tubos não é representado, conforme prática corrente. Os tubos são considerados por sua superfície média, aproximada por uma casca poliédrica.

O desenvolvimento computacional é específico para o problema, sendo a entrada de dados bastante reduzida, praticamente restrita às características geométricas da junta. O procedimento permite a especificação pelo usuário de diferentes graus de refinamento da malha e inclui diversas opções de plotagem. A saída dos resultados consiste nas coordenadas de cada ponto gerado e na conectividade dos elementos obtidos.

O procedimento básico de geração automática desenvolvido, embora direcionado para juntas tubulares, apresenta características que possibilitam seu emprego com vantagem em problemas bastante distintos. Aplicações onde o contorno é completamente variável e a geração deve ser do tipo aleatório podem ser convenientemente abordadas, exigindo naturalmente uma programação específica.

O presente trabalho é constituído por seis capítulos. O segundo capítulo aborda considerações gerais sobre malhas de juntas tubulares e desenvolvimentos anteriores. O terceiro

capítulo corresponde ao procedimento desenvolvido e o quarto apresenta o manual do usuário da programação computacional. Diagramas de blocos são apresentados, mas preferiu-se não incluir a listagem das rotinas, uma vez que aumentaria consideravelmente o volume do trabalho, sem trazer maiores contribuições. Os aspectos básicos do procedimento de geração da malha são reapresentados de maneira condensada no manual do usuário, de modo a permitir a utilização da programação apenas com sua consulta. O quinto capítulo ilustra e exemplifica a geração automática de malhas, comentando aspectos específicos de cada caso. O sexto capítulo apresenta considerações finais e sugere desenvolvimentos, aprimoramentos e ampliações. Incluem-se também dois apêndices referentes aos sistemas de coordenadas utilizados e à determinação das linhas de junção dos tubos.

CAPÍTULO II

MALHAS PARA ANÁLISE DE JUNTAS TUBULARES

II.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o desenvolvimento dos computadores, sua utilização em aplicações técnicas cresceu enormemente, de tal modo que na atualidade seu emprego na Engenharia assumiu fundamental importância. Principalmente na Engenharia Civil e especificamente na Análise Estrutural, diversos sistemas computacionais foram desenvolvidos e são usados largamente. Métodos numéricos, incluindo o Método dos Elementos Finitos, foram programados utilizando técnicas sofisticadas e refinadas. Atualmente estruturas de diversos tipos e com grande número de graus de liberdade podem ser analisadas rápida e confiavelmente. Linguagens orientadas para problemas específicos foram desenvolvidas, de modo a não exigir do usuário grande especialização em computação.

Na utilização dos programas e sistemas estruturais, a tarefa de Engenharia, além de naturalmente envolver a análise e interpretação dos resultados, implica uma cuidadosa preparação e codificação dos dados de entrada. Nas aplicações do Método dos Elementos Finitos, esta preparação é particularmente trabalhosa e altamente susceptível a erros, uma vez que é necessário discretizar o domínio através de uma malha de elementos com características adequadas ao problema. Para cada pon

to nodal deverão ser especificadas suas coordenadas no sistema de referência adotado, e para cada elemento deverá ser informada sua conectividade, ou seja, os pontos a ele pertencentes.

Com a evolução das aplicações do Método dos Elementos Finitos, esquemas e algoritmos de geração automática de dados foram desenvolvidos, de modo que a geração da malha também fosse feita pelo computador. Um histórico dos trabalhos realizados é apresentado por ELLWANGER ⁽¹⁴⁾. Atualmente, o Método dos Elementos Finitos já está bem estabelecido, e os novos desenvolvimentos na área buscam facilitar as especificações dos dados de entrada através da geração automática por meio de rotinas mais eficientes e completas.

Esquemas de geração automática vêm sendo incorporados aos sistemas de análise estrutural e apresentam características de generalidade que permitem tratar diferentes geometrias, dentro de determinadas classes usuais de estruturas. A generalidade conduz, entretanto, a complexidade e a maior sofisticação. Para problemas de características topológicas muito particulares, esquemas especializados de geração automática devem ser desenvolvidos, incluindo-se aí as juntas tubulares. Tais esquemas, embora aplicáveis apenas a problemas específicos, são bastante direcionados, exigindo uma especificação de dados de entrada normalmente simples e reduzida. Especificamente na área *offshore* e em termos nacionais, recente trabalho foi apresentado por MACIEL ⁽¹⁵⁾ em tese de Mestrado na COPPE, abordando a geração automática de dados para a análise

estrutural de plataformas.

O Método dos Elementos Finitos dispõe atualmente de inúmeros elementos desenvolvidos e direcionados para diversas aplicações e dos mais variados tipos e características, desde os mais simples aos mais complexos. Entre os elementos mais elaborados aplicados à análise de juntas tubulares, cita-se o elemento de casca isoparamétrico tridimensional considerado por REIMER *et alii* (16), permitindo a modelagem inclusive do cordão de solda e com pontos nodais nas superfícies interna e externa da casca. Aplicações envolvendo formulações mistas de elementos, considerando como incógnitas nodais deslocamentos e momentos, foram realizadas por HANS *et alii* (17). De acordo com KUANG *et alii* (7), aplicações têm sido feitas utilizando sofisticados elementos de dupla curvatura para cascas finas, onde são incluídas em cada nó, além dos seis graus de liberdade de movimentos, suas derivadas primeiras e segundas.

A utilização de elementos sofisticados conduz a uma modelagem mais real e normalmente permite a utilização de malhas com menor número de elementos. As dificuldades adicionais, entretanto, oriundas do esforço extra necessário para a especificação completa da malha e dos cuidados com o comportamento numérico quanto às condições de contorno impostas, além da determinação mais trabalhosa da matriz de rigidez do elemento, nem sempre tornam seu uso vantajoso quando comparado com elementos menos elaborados. Elementos planos simples, como triângulos e quadriláteros, são normalmente mais utilizados e, em princípio, aumentando-se o número de elementos, os resultados

convergem para a solução exata, a despeito das aproximações nas representações da superfície curva e do complexo campo de tensões atuante nas juntas tubulares.

No desenvolvimento do procedimento de geração automática objeto deste trabalho, optou-se pela forma triangular por facilidade na representação dos contornos e na obtenção de transições geometricamente suaves entre as regiões com diferentes graus de refinamento. Sua utilização permitiu o emprego na etapa de triangularização dos pontos gerados do esquema apresentado por NELSON ⁽¹³⁾. Esse esquema é bastante adequado para problemas de domínios arbitrários e contornos irregulares. Os triângulos obtidos tendem a ser o mais equiláteros possíveis, em função dos pontos disponíveis. O algoritmo apresenta grandes vantagens sobre esquemas semelhantes, uma vez que não há necessidade de, a cada novo elemento gerado, verificar-se se ocorreu alguma superposição com elementos anteriores. O processo será abordado com maiores detalhes na seção III.4.

II.2 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Para obtenção de uma modelagem satisfatória para as juntas tubulares, o algoritmo de geração automática e sua programação devem apresentar, de modo geral, as características comentadas a seguir, algumas comuns a outros tipos de problemas.

Os elementos devem aproximar-se tanto quanto possível de polígonos regulares, onde dimensões básicas de largura e

altura tendem a ser iguais. Quadriláteros devem ser próximos de quadrados, e os triângulos, tipo de elemento de interesse específico para esse trabalho, devem tender para triângulos equiláteros. Naturalmente, uma vez que as malhas normalmente apresentam gradação no tamanho dos elementos, a regularidade completa não é possível devido às transições necessárias. Objetiva-se, ao buscar a regularidade, evitar problemas numéricos na solução do sistema de equações, possíveis de ocorrer com elementos muito alongados e distorcidos.

Nas juntas tubulares os maiores gradientes de tensões ocorrem na vizinhança imediata das junções dos tubos. A geração automática deve, portanto, ser capaz de concentrar elementos menores no entorno das linhas de junção, de modo que a modelagem possa traduzir o comportamento real das tensões localizadas atuantes na peça. GIBSTEIN ⁽⁸⁾, em estudo realizado para juntas "T", adotou como comprimento básico para os elementos com lado sobre uma linha de junção o valor de $1,25 R^{1/2}$ para o tubo principal e $1,04 R^{1/2}$ para os tubos secundários, sendo "R" o raio do tubo em questão. Esse dado é apenas uma indicação, uma vez que o comportamento depende do elemento utilizado e de sua formulação. Ao se afastarem da junção, as tensões tendem a uma uniformização. Essa característica do problema deve ser aproveitada através de uma gradação no tamanho dos elementos, que deverão ser maiores à medida que se aproximam das extremidades dos tubos consideradas na análise. Não se deve, entretanto, chegar a um tamanho que leve a uma representação muito grosseira para a superfície curva. Também como simples indicação, VISSER ⁽¹¹⁾ cita como comprimento bá

sico máximo para os elementos o valor de $R/2$, sendo "R" o raio do tubo em questão. Esse valor conduz a cerca de 12 a 13 elementos ao longo da circunferência completa dos tubos na região distante da junção.

A gradação da malha é importante porque, mesmo com sua utilização, a determinação das tensões localizadas nas juntas tubulares através do Método dos Elementos Finitos conduz normalmente a malhas com grande número de pontos nodais e, consequentemente, a um esforço computacional razoável. A gradação, todavia, deve ser suave, de modo que a transição geométrica não seja grosseira e que os elementos não sejam muito deformados. ELLWANGER ⁽¹⁴⁾ observa que, para malhas de aplicação genérica com geração do tipo aleatória, a transição de regiões vizinhas com relação de densidade nodal superior a 2,5 apresenta triângulos pouco equiláteros e triângulos vizinhos com grande diferença de áreas. GRESTE ⁽¹²⁾ indica que malhas satisfatórias de juntas tubulares são obtidas com distância entre pontos vizinhos igual a 1,2 vezes o intervalo precedente.

A geração automática deve ter flexibilidade para produzir malhas de diferentes níveis de refinamento. Deve permitir ao usuário especificar, em função das características peculiares de cada problema, o grau de refinamento desejado. Essa flexibilidade possibilita a realização de análises preliminares de menor precisão, mas de menor custo computacional, e permite o estabelecimento de várias malhas cujo número de elementos aumentaria gradativamente, possibilitando verificar a convergência do método em determinada aplicação.

Os procedimentos de geração automática de dados apresentam, de maneira geral, dois princípios distintos de geração. Um é voltado para estruturas de contornos relativamente regulares, utilizando, portanto, esquemas determinísticos baseados em características, padrões e arranjos repetitivos das estruturas. É adequado para a maioria dos modelos estruturais identificados na prática. Outro tipo de procedimento é direcionado para problemas cujos contornos são totalmente arbitrários, devendo ser completamente predefinidos pelo usuário. Utilizam processos de características aleatórias para a geração e são aplicados, por exemplo, em problemas de hidrodinâmica computacional. Os dois tipos de procedimentos são abordados por ELLWANGER (14).

A geração especializada para o problema de juntas tubulares apresenta, entretanto, aspectos bem particulares. As juntas possuem características de repetitividade, mas as linhas que definem as interseções dos tubos apresentam formas bastante variadas, em função dos vários parâmetros geométricos envolvidos. Os esquemas de geração devem reunir, portanto, aspectos dos dois tipos citados.

O estabelecimento de procedimentos de geração automática para juntas tubulares não é simples, exatamente pela variação no formato das linhas correspondentes às junções. Tais linhas não são representadas por funções analíticas e devem ser definidas por pontos. Como já citado, os maiores gradientes de tensões ocorrem no entorno das junções, onde é necessário, portanto, um maior refinamento da malha. Tais linhas são, as

sim, de extrema importância para a geração, e o esquema automático deve ser apto a considerar seus diferentes formatos, com implicações na malha como um todo. De acordo com GRESTE⁽¹²⁾, a figura II.1 ilustra para um exemplo a variação nas formas das junções, sendo representada a metade da superfície dos tubos, uma vez que a junta é simétrica.

Os problemas de juntas tubulares conduzem normalmente a malhas com elevado número de pontos nodais. O sistema possui um grande número de graus de liberdade, exigindo, para uma solução eficiente, que sua largura de banda seja otimizada para a menor possível, diminuindo o número de acessos à memória auxiliar, fator primordial para o tempo de processamento.

Outro aspecto é o número de operações. A equação II.1 indica o número de operações, "NOP", para a solução de um sistema simétrico de "N" equações pelo método de Gauss, sendo "SB" a semilargura de banda.

$$NOP = 0,5 \cdot N \cdot SB^2 + 1,5 \cdot N \cdot SB \quad (\text{eq. II.1})$$

A equação II.2 determina o valor para a semilargura de banda, "SB", sendo "D" a máxima diferença de numeração de pontos que compõem um elemento da malha e "G" o número de graus de liberdade por ponto nodal.

$$SB = G \cdot (D + 1) \quad (\text{eq. II.2})$$

Deve-se procurar, portanto, uma numeração ótima dos

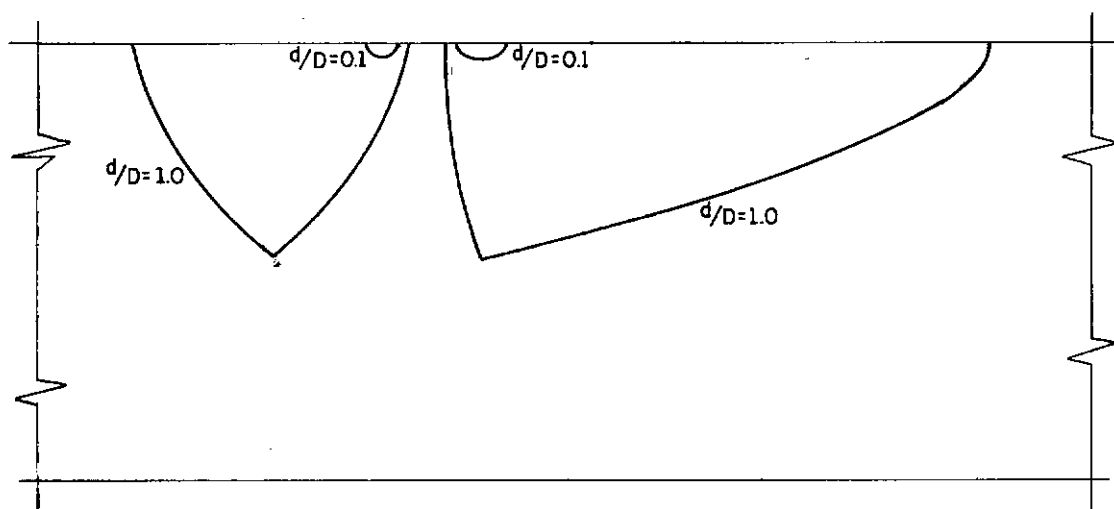
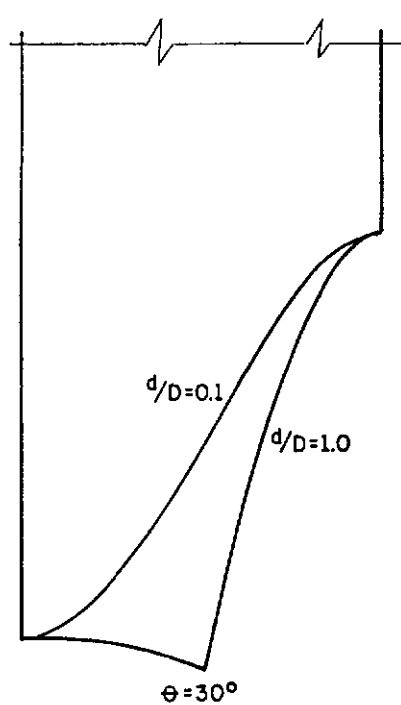
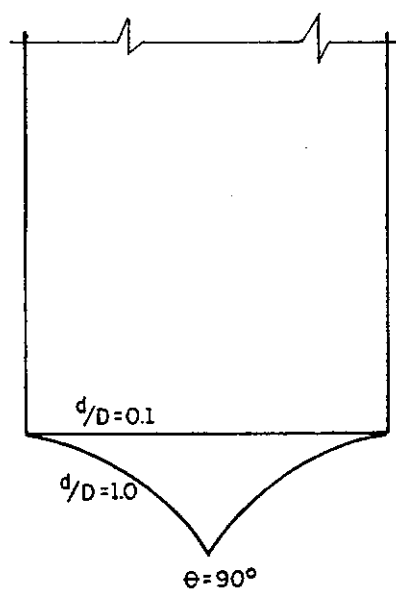
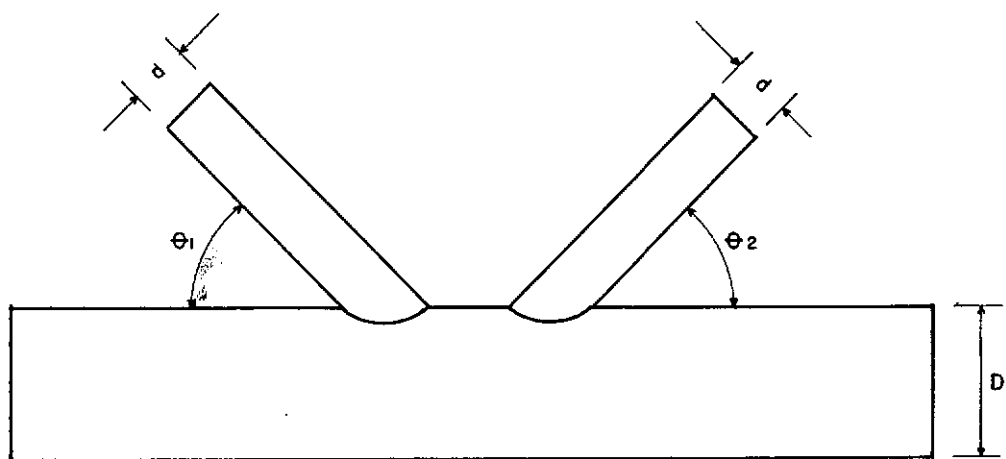


FIG. II.1 - VARIAÇÃO DAS LINHAS DE JUNÇÃO

pontos da malha. Rotinas computacionais de aplicação geral para renumeração de pontos foram desenvolvidas e podem ser incluídas nos procedimentos de geração automática como uma etapa complementar. Esquemas mais eficientes podem, entretanto, ser obtidos quando incorporados diretamente na geração da malha, tirando partido das características peculiares do problema.

É conveniente que a geração automática forneça os dados de coordenadas dos pontos, conectividade dos elementos e outras informações, identificando a qual tubo da junta pertencem, facilitando a utilização do procedimento de subestruturas na fase de análise das tensões.

A aplicação da técnica de subestruturas é vantajosa nos problemas com grande número de graus de liberdade e onde a topologia da estrutura conduz naturalmente à consideração de componentes separados, características essas típicas das juntas tubulares. Cada membro tubular interage com os demais através de um número limitado de pontos nodais situados na linha de interseção, e todos os efeitos são transmitidos unicamente através desses pontos. Cada tubo pode ser considerado como uma subestrutura e tratado como um sistema separado de elementos finitos. Sua matriz de rigidez é reduzida aos graus de liberdade correspondentes aos pontos da junção através da técnica de condensação estática. É montado um sistema final onde cada tubo tem o seu efeito considerado através das equações condensadas correspondentes. Os vetores de carga são também reduzidos aos pontos das junções e, com os deslocamentos obtidos

nesse sistema, determinam-se os deslocamentos em cada subestrutura por meio de uma retrossubstituição.

Uma alternativa um pouco diferente é empregada por GRESTE ⁽¹²⁾ e normalmente é preferida para a análise de juntas tubulares. A subestrutura correspondente ao tubo principal não é condensada, e a seu conjunto de equações são incorporadas as equações condensadas dos tubos secundários, sendo esse sistema então resolvido. O esquema é interessante, pois evita a condensação da matriz de rigidez do tubo principal. A técnica é conhecida como de superelemento, pois os pontos de cada junção podem ser vistos como constituindo um elemento finito na malha do tubo principal, elemento esse que traduz o comportamento do tubo secundário respectivo.

A consideração de cada subestrutura separadamente apresenta diversas vantagens. Permite a numeração de pontos nodais e dos elementos de cada tubo independentemente dos demais. Possibilita, assim, tirar maiores vantagens da topologia, visando a obtenção de uma largura de banda mínima para os sistemas de equações. Os sistemas podem ser solucionados independentemente, exigindo áreas de memória menores que a necessária para o sistema global da estrutura. Similaridades entre subestruturas podem ser aproveitadas, e matrizes, condensações e resultados parciais podem ser armazenados em memórias auxiliares, permitindo o reaproveitamento no caso de modificações parciais que envolvam apenas alguns tubos.

Os esquemas de geração automática da malha de elementos

finitos para juntas tubulares normalmente discretizam separadamente as regiões do tubo principal internas às linhas das junções, considerando-as também como subestruturas. Não é o caso do desenvolvimento objeto deste trabalho, onde o tubo principal é considerado a princípio como um conjunto único.

A condensação das matrizes de cada tubo e outras operações que são realizadas na subestruturação correspondem a um trabalho computacional adicional. O emprego da técnica de subestruturas pode não ser vantajoso, dependendo da redução obtida na largura de banda. De acordo com LIAW *et alii* (18), a opção do usuário pela subestruturação traz vantagens de modo geral nos problemas onde o número de tubos secundários é superior a três ou quatro. Logicamente esse limite depende das características do computador disponível e principalmente das técnicas numéricas empregadas pelo sistema de análise estrutural.

II.3 - DESENVOLVIMENTOS ANTERIORES

Para a realização de análise de tensões em juntas tubulares é praticamente imprescindível, como já comentado, que a geração da malha de elementos finitos seja feita automaticamente por computador. Não obstante a importância do problema, as referências bibliográficas de trabalhos na área indicam quase que exclusivamente como procedimento de geração especializado para juntas tubulares o esquema básico estabelecido por GRESTE (12) e posteriormente aprimorado e expandido por LEICK & POTVIN (4). Os comentários a seguir abordam unicamen

te esse procedimento, uma vez que não se dispõe de informações de outros esquemas que tenham sido desenvolvidos, apesar da extensa pesquisa bibliográfica realizada.

REIMER *et alli* ⁽¹⁶⁾ citam um projeto de pesquisa cujo planejamento incluía o estabelecimento de um procedimento de geração automática em juntas para elementos tridimensionais. A posição atual dos trabalhos, entretanto, não é conhecida.

GRESTE ⁽¹²⁾ desenvolveu um procedimento de geração automática para juntas tubulares de configuração plana tipo "K", utilizando uma técnica de mapeamento. As superfícies desenvolvidas dos tubos são divididas em regiões previamente estabelecidas, e ao longo dos contornos são considerados pontos a espaçamentos prefixados. Cada região é composta por uma ou mais sub-regiões. A cada sub-região é associada uma sub-região auxiliar, definida em outro espaço vetorial, de forma geométrica simples, como quadrado, retângulo ou trapézio. A sub-região auxiliar é discretizada através de uma malha de elementos quadrados, em número igual ao da região real correspondente. A cada ponto da sub-região auxiliar corresponde um ponto na sub-região real e, através do conhecimento prévio das coordenadas dos pontos reais dos contornos, é estabelecida uma função de mapeamento entre as sub-regiões, de modo a determinar as coordenadas dos demais pontos reais. Na transferência dos pontos os elementos são deformados, de modo que os quadrados correspondem na realidade a quadriláteros. Para que a distorção dos elementos no plano real não seja excessiva, a forma geométrica da sub-região auxiliar associada deve ser escolhida

convenientemente. Foi considerado que, dentro de determinados limites de relações de parâmetros geométricos das juntas tubulares e dependendo de como a junta foi dividida em regiões, estas apresentam características comuns, incluindo a disposição e arranjo dos elementos, permitindo um tratamento repetitivo.

O procedimento foi desenvolvido para juntas simples, do tipo "K", sem superposição, com diâmetros dos tubos secundários iguais, relação entre o diâmetro dos tubos secundários e o diâmetro do tubo principal compreendida entre 0,1 e 1,0. Para os ângulos entre os tubos secundários e o tubo principal, " θ_1 " e " θ_2 " indicados na figura II.1, as limitações são que " θ_1 " não deve ser inferior a 30° e " θ_2 " não deve ultrapassar 90° .

Quatro níveis de diferentes graus de refinamento da malha podem ser especificados. Em termos do número de nós para cada opção, a proporção é indicada pelos valores relativos 1,0; 2,0; 3,2 e 4,3. O usuário não tem acesso direto à variação do refinamento, pois o esquema é predefinido para cada opção devido ao processo de geração.

Na divisão da junta em regiões, cada tubo secundário compreende uma única região, com a consideração de dois esquemas diferentes, em função dos valores dos ângulos " θ_1 " e " θ_2 ", sendo um esquema para a condição " θ_1 " não inferior a 55° e " θ_2 " não superior a 90° , e outro esquema para " θ_1 " e " θ_2 " inferiores a 55° . A superfície do tubo principal interna a ca

da linha de junção com tubos secundários compreende uma única região e dois esquemas são também considerados, um para " θ_1 " não inferior a 45° e " θ_2 " não superior a 90° , e outro para " θ_1 " e " θ_2 " inferiores a 45° . A superfície restante do tubo principal é dividida em múltiplas regiões, de modo a possibilitar a consideração do complexo arranjo de elementos nas áreas próximas às interseções.

A obtenção de malhas adequadas através do esquema em questão depende fundamentalmente da determinação dos pontos ao longo dos contornos das regiões e sub-regiões. Após várias tentativas, considerando-se diferentes geometrias e refinamentos, regras empíricas para determinar o número de pontos em cada contorno foram estabelecidas, variando em função do grau de refinamento escolhido.

A malha gerada é composta basicamente de quadriláteros. Entretanto, por necessidades geométricas, alguns elementos triangulares são também gerados.

O procedimento de geração automática foi posteriormente aprimorado por LEICK e POTVIN ⁽⁴⁾, sendo expandido para abranger outras configurações geométricas de juntas tubulares.

Entre outras modificações, a limitação de tubos secundários de igual diâmetro foi removida através da consideração de esquemas diferentes para cada lado da junta. Modificações foram introduzidas de modo a permitir a aplicação para juntas do tipo "T", pois originalmente a consideração de um

Único tubo secundário conduzia a malhas com grandes irregularidades. A possibilidade de geração em juntas do tipo "K" com um terceiro membro secundário perpendicular ao tubo principal foi introduzida, além da geração para juntas do tipo "X". Um importante aprimoramento foi a consideração de juntas com superposição dos membros secundários.

Apesar das melhorias acrescentadas, o procedimento básico, entretanto, não foi alterado, e as juntas devem ser analisadas através de configurações planas típicas, não sendo possível a geração de malhas para juntas com membros secundários não contidos em um único plano.

A geração não é do tipo aleatória, mas basicamente determinística. Os aspectos críticos do processo residem na fixação das regiões e sub-regiões de formato adequado e no estabelecimento dos pontos ao longo dos contornos. O processo não é generalizável para qualquer tipo de junta, e cada novo caso deve ser cuidadosamente estudado e desenvolvido. As regras empíricas para determinar o número de pontos nos contornos das regiões são de difícil formulação e dependem de uma série de fatores geométricos e do grau de refinamento da malha. Desdobram-se em múltiplos casos, situações e faixas de parâmetros. Limites geométricos de validade de aplicação do procedimento são estabelecidos, mas ainda assim malhas imperfeitas podem ser geradas em certas situações.

Não obstante os problemas indicados, o procedimento de GRESTE ⁽¹²⁾ é basicamente o único especializado para a

geração automática de malhas de elementos finitos para juntas tubulares relativamente difundido e citado nos trabalhos e estudos de concentração de tensões nas juntas.

CAPÍTULO III

O NOVO PROCEDIMENTO DE GERAÇÃO APLICADO A JUNTAS TUBULARES

III.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROCEDIMENTO

As características de originalidade do procedimento de de desenvolvido consistem no esquema em si e no tratamento dado ao problema de geração de malhas em juntas tubulares. As juntas são tratadas de maneira geral, não se restringindo a configurações geométricas típicas. Todas as linhas de junção dos tubos secundários são simultaneamente consideradas na superfície do tubo principal.

A geração é realizada basicamente na superfície planificada dos tubos, desenvolvida a partir de uma geratriz preestabelecida internamente. O procedimento não considera esta geratriz de abertura como um limite real para o contorno. Nenhum fator limitante é introduzido, e o tratamento lógico traduz a continuidade física existente no tubo. Como a geratriz de abertura é prefixada, ela pode interceptar alguma linha de junção de tubo secundário quando da geração no tubo principal, e o procedimento inclui o seu tratamento.

Quatro sistemas cartesianos diretos são utilizados para referenciar as coordenadas ao longo do processo: o sistema local, bidimensional, da superfície desenvolvida de cada tubo, o sistema local de cada tubo secundário, o sistema global auxi

liar, também um para cada tubo secundário, e o sistema global do problema, os três últimos tridimensionais.

Completada a geração na superfície desenvolvida de cada tubo, as coordenadas dos pontos estão referidas ao sistema local do plano correspondente. No caso do tubo principal, uma transformação elementar passa as coordenadas do sistema local do plano diretamente para o sistema global. Para os tubos secundários, transformações intermediárias são realizadas. As coordenadas no sistema local do plano são transformadas para o sistema local do tubo correspondente, posteriormente para o sistema global auxiliar, também referente ao tubo, e finalmente para o sistema global da junta. As transformações intermediárias e respectivos sistemas não são estritamente necessários, e a mudança de coordenadas poderia ser feita diretamente para o sistema global. A transformação em etapas conduz, entretanto, a maior facilidade e clareza, possibilitando uma programação mais modulada.

Na descrição a seguir de cada um dos sistemas de coordenadas, considera-se como sentido positivo para os eixos dos tubos secundários o sentido da junção para a extremidade oposta. A figura III.1 indica o posicionamento dos sistemas. As relações matemáticas que expressam as transformações de coordenadas de um sistema para outro constam do apêndice I.

O sistema global da junta, (X, Y, Z) , é o único estabelecido pelo usuário. Tem como limitação apenas o fato de que o eixo "X" deve necessariamente coincidir com o eixo do

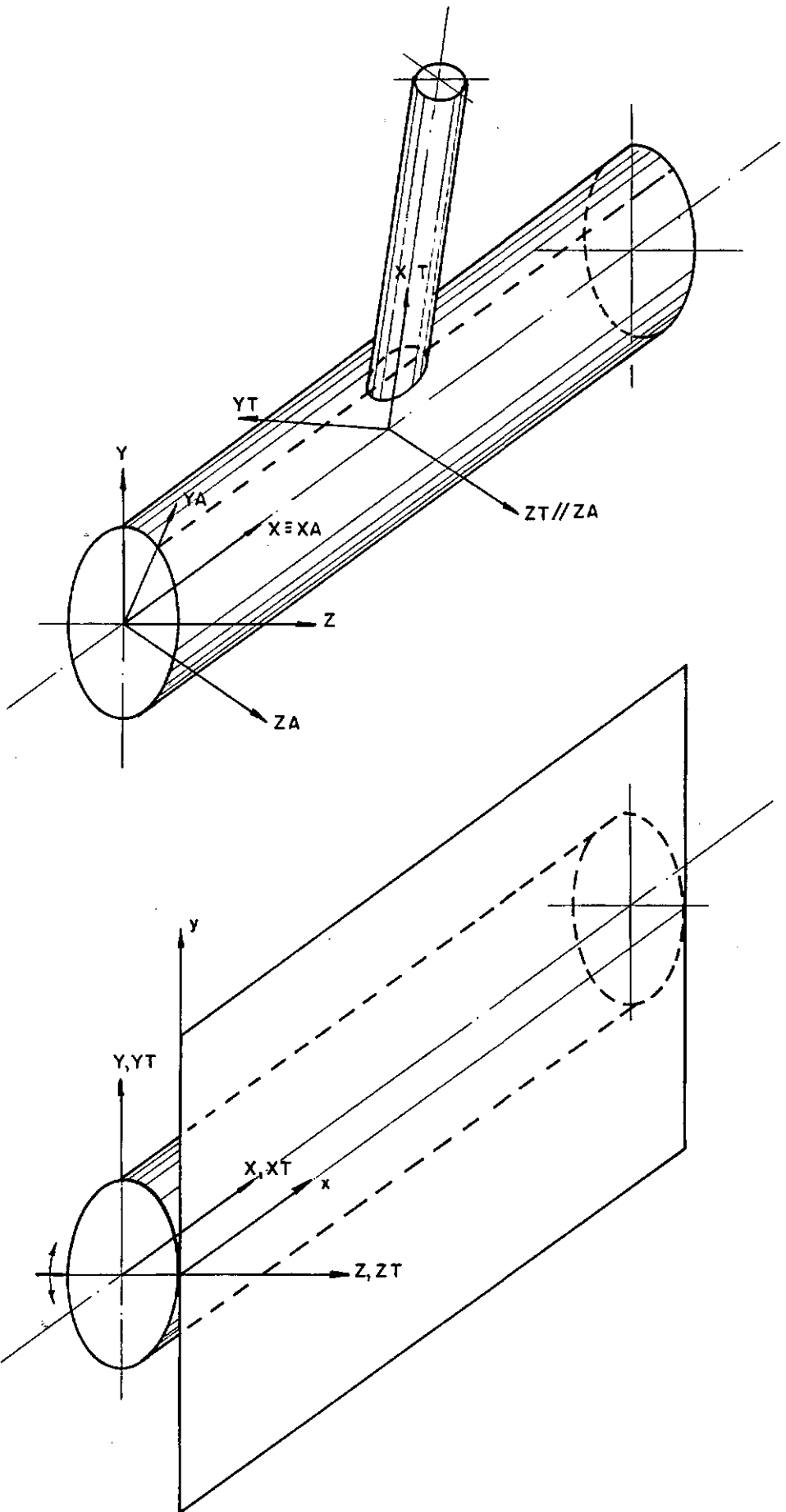


FIG. III.1 - SISTEMAS DE COORDENADAS

tubo principal.

O sistema global auxiliar, (X_A, Y_A, Z_A) , é fixado para cada tubo secundário através de uma rotação do sistema global em torno de seu eixo "X", de modo que o eixo do tubo secundário em questão esteja contido no plano definido pelos eixos globais auxiliares "X_A" e "Y_A" e ainda que sua projeção sobre o eixo "Y_A" tenha o mesmo sentido que o próprio "Y_A".

O sistema local de cada tubo secundário, (X_T, Y_T, Z_T) , é obtido a partir do sistema global auxiliar através de uma translação e de uma rotação. A translação consiste em posicionar a origem do sistema no ponto do eixo do tubo principal correspondente a sua interseção com o eixo do tubo secundário em questão. A rotação é aplicada em torno do eixo "Z_A", de modo que o eixo "X_T" coincida em direção e sentido com o eixo do tubo secundário.

O sistema local do plano correspondente à superfície desenvolvida do tubo principal, (x, y) , tem sua origem no ponto $(X, Y, Z) = (0, 0, R)$, em coordenadas globais, sendo "R" o raio do tubo principal. O eixo "x" tem a mesma direção e sentido que o eixo "X", e o "y" tem a mesma direção e sentido que o eixo "Y". Assim o eixo "x" é uma geratriz da superfície do tubo, e o eixo "y" é tangente à seção circular. A geratriz de abertura da superfície cilíndrica é diametralmente oposta ao eixo "x". Para os tubos secundários o esquema é análogo, sendo que cada sistema local da superfície desenvolvida tem origem no ponto $(X_T, Y_T, Z_T) = (0, 0, r)$, em coordena

das locais do tubo, sendo "r" o raio do tubo secundário. O eixo "x" tem a mesma direção e sentido que o "XT", e o eixo "y" tem a mesma direção e sentido que o "YT". A geratriz de abertura é também diametralmente oposta ao eixo "x".

O usuário da programação computacional da geração automática só tem contacto com o sistema de coordenadas globais. Tanto a especificação dos dados de entrada, consistindo basicamente na geometria da junta, quanto a saída de resultados, em termos das coordenadas dos nós gerados, são feitas em coordenadas globais. Apenas o conhecimento da posição da geratriz de abertura dos tubos é importante para a interpretação das plotagens da malha, uma vez que os desenhos são realizados considerando as superfícies desenvolvidas.

O fluxograma geral do procedimento de geração consta da figura III.2. Sendo especializado para juntas tubulares, a entrada de dados é simples e reduzida, restringindo-se à definição da geometria, a parâmetros simples que fixam o grau de refinamento desejado para a malha e às opções de plotagens e de regularizações posteriores da malha. Os tubos são tratados separadamente. Após o processamento de cada tubo é realizada uma saída parcial de resultados incluindo plotagens. As etapas de entrada e saída serão comentadas em detalhe no capítulo IV. Os procedimentos e respectivas rotinas de determinação das linhas de junção, de geração de pontos, de triangulação dos pontos e de regularização da malha serão considerados nas seções a seguir. Complementando as informações do fluxograma geral, observa-se que as rotinas de geração dos pon

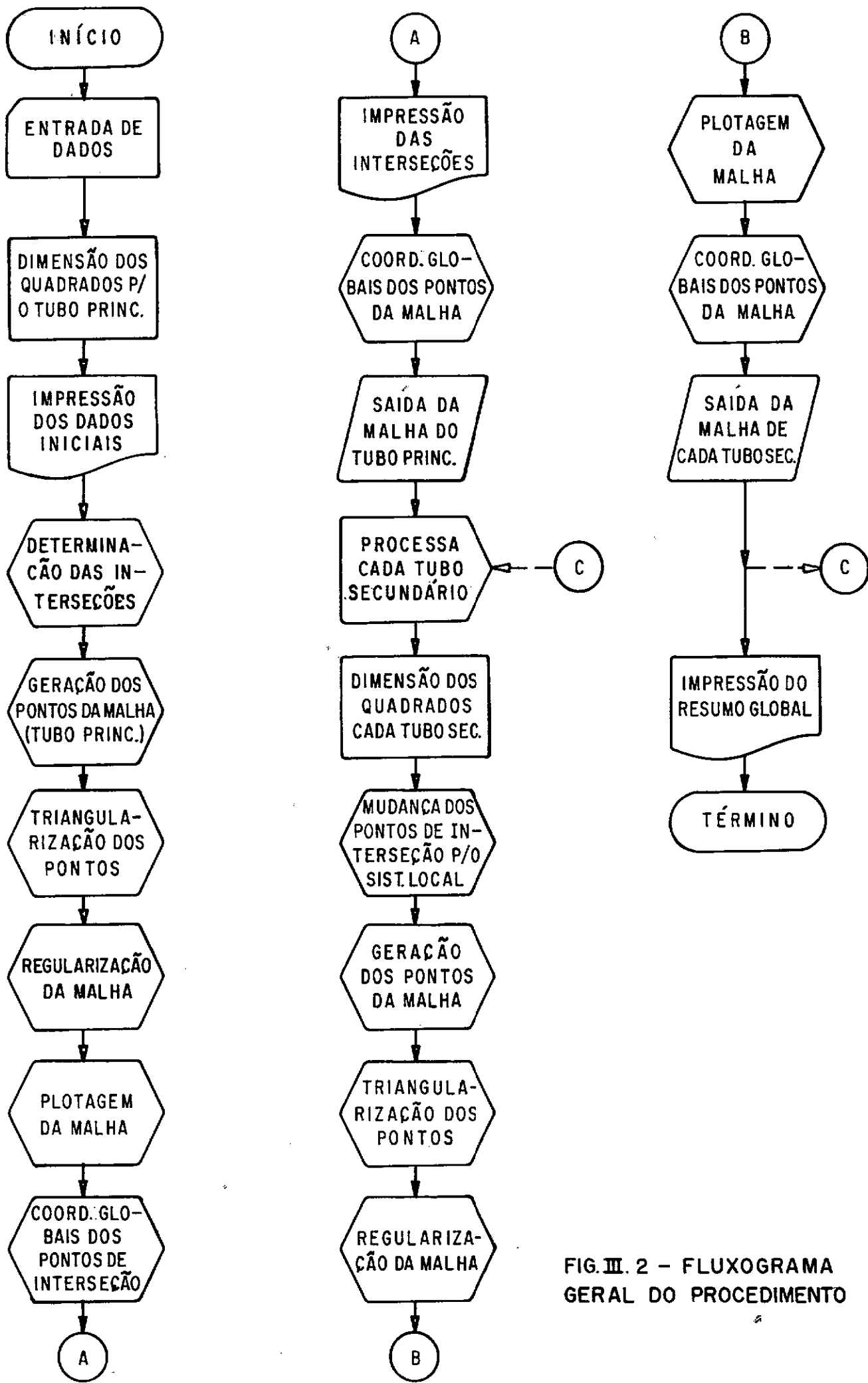


FIG. III. 2 - FLUXOGRAMA GERAL DO PROCEDIMENTO

tos, de triangularização e de regularização são comuns para o tubo principal e para os tubos secundários. As diferenças de procedimento, em função do tipo de tubo, são consideradas diretamente pelas rotinas.

O processamento separado de cada tubo é extremamente vantajoso não só sob o ponto de vista de modulação e estruturação da programação, mas principalmente por permitir o tratamento de problemas de grande porte sem um consumo excessivo de memória real. Maior eficiência é obtida tanto em área de memória como em tempo de processamento, pois não é utilizada memória auxiliar, de acesso mais lento. Concluída a saída de resultados de cada tubo, apenas as informações imprescindíveis para a geração nos tubos subsequentes são mantidas, sendo liberada a área de uso comum para o processamento do tubo seguinte. Outra característica que contribui para a eficiência é o emprego de uma estrutura indexada de dados, utilizando matrizes que englobam submatrizes de tamanho variado e que podem se desdobrar em outras submatrizes, sendo feita a localização dos dados por meio de apontadores. A estrutura de dados será detalhada na seção III.6.

III.2 - DETERMINAÇÃO DAS INTERSEÇÕES

A determinação das interseções dos tubos consiste na fixação das linhas das junções decorrentes do acoplamento da extremidade dos tubos secundários na superfície do tubo principal, ou seja, é a determinação das "bocas-de-lobo" dos tubos que compõem a junta tubular. Conforme já citado, as linhas

das junções não são traduzidas por funções analíticas e devem ser determinadas através de pontos. Estes pontos são comuns aos dois tubos cuja junção está sendo determinada e, na descrição a seguir, são denominados pontos de interseção. O fluxograma da rotina correspondente é apresentado na figura III.3.

A rotina é chamada uma única vez, determinando sucessivamente as interseções correspondentes a cada tubo secundário. Uma vez que o número de pontos que definem cada interseção varia com o problema e normalmente não é o mesmo para todas as interseções, suas coordenadas são armazenadas em uma única matriz, dimensionada para toda a junta. A localização dos pontos de cada interseção é feita através de apontadores contidos em um vetor auxiliar.

O único dado que o usuário deve fornecer, necessário para a determinação dos pontos, consiste na distância básica a ser adotada entre os pontos sucessivos de uma interseção. Esta distância é válida para toda a junta, sendo importante para o refinamento da malha, pois estabelece o valor do lado do menor elemento e a dimensão inicial para o reticulado utilizado na rotina de geração dos pontos, como será detalhado na seção III.3. Na fixação desta distância o usuário deve considerar também as características geométricas da junta. No caso de linhas de junção próximas, a distância não deve ser superior ao afastamento entre as junções. O número de pontos que representarão uma linha de junção é, portanto, determinado internamente, não sendo fixado diretamente pelo usuário.

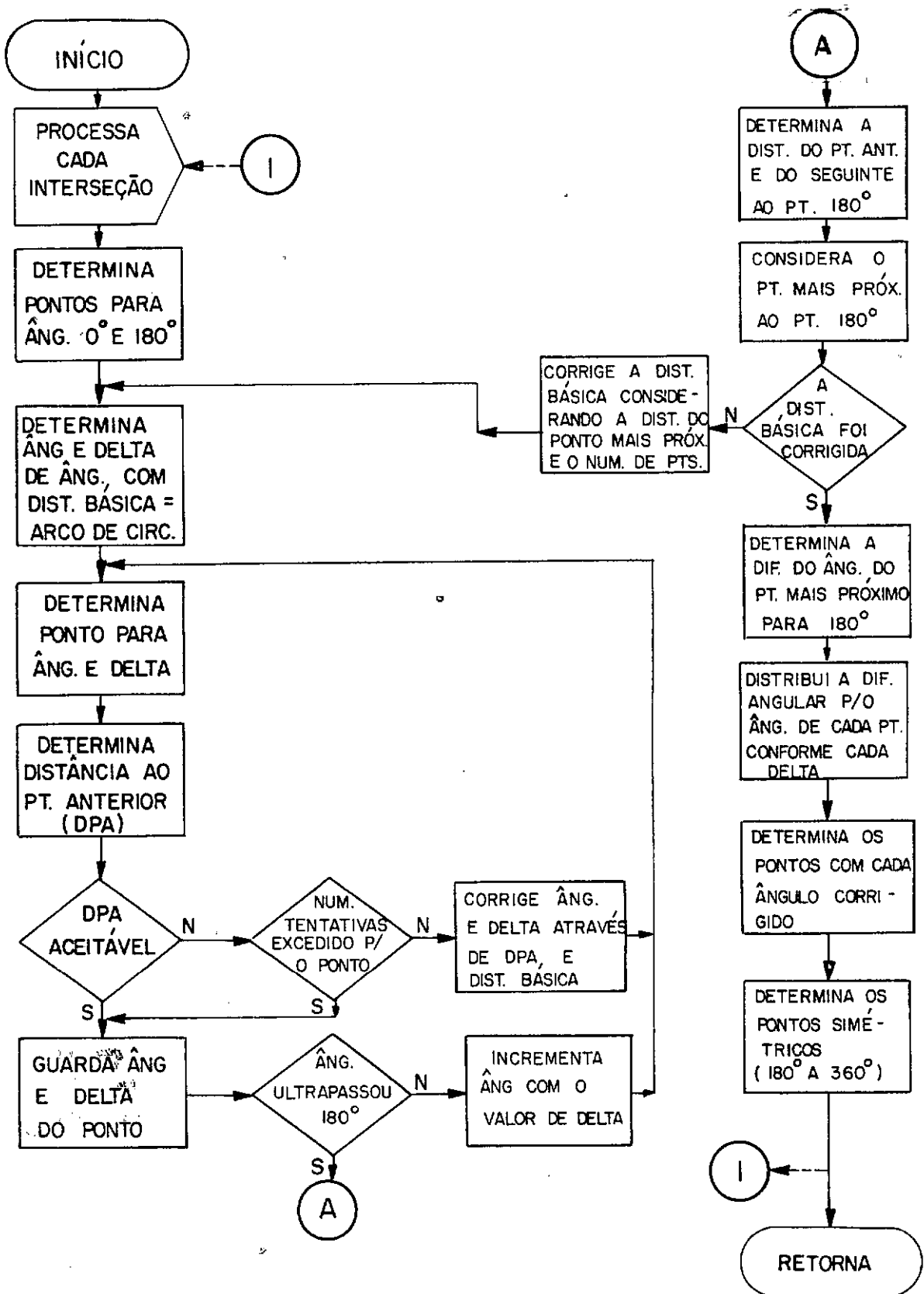


FIG. III. 3 - DETERMINAÇÃO DAS INTERSEÇÕES

Devido às características do procedimento utilizado para a geração dos demais pontos da malha, é necessário que a rotina determine os pontos sucessivos de cada interseção aproximadamente eqüidistantes.

Para cada tubo secundário os pontos de interseção são gerados inicialmente no respectivo sistema de coordenadas global auxiliar, através da determinação da interseção de retas geratrizes do tubo secundário com a superfície do tubo principal.

O primeiro ponto corresponde à geratriz que passa pelo ponto $(X_T, Y_T, Z_T) = (0, r, 0)$, no sistema local do tubo, sendo "r", o raio do tubo secundário.

A geratriz relativa ao ponto de interseção seguinte é fixada inicialmente pelo ponto da seção circunferencial do tubo secundário, cujo raio correspondente está defasado de um ângulo " α " do raio do ponto anterior. Este ângulo, medido a partir do eixo "YT" e orientado para o eixo "ZT", é determinado de modo que o arco de círculo correspondente tenha comprimento igual ao valor fornecido como distância básica entre pontos de interseção sucessivos. É uma aproximação inicial, uma vez que, pela característica geométrica do problema, o comprimento do arco de círculo não corresponde ao mesmo comprimento sobre a linha de junção, e ainda arcos iguais não correspondem a comprimentos iguais na junção.

Determinadas as coordenadas do ponto de interseção no

sistema global auxiliar, é feita uma transformação para o sistema da superfície desenvolvida do tubo principal e calculada a distância do ponto de interseção que está sendo gerado para o ponto anterior. Caso esta distância difira da distância básica fornecida de um valor superior a um percentual admissível, o ponto não é aceito. O ângulo " α " é corrigido linearmente, e o processo é repetido. Na programação desenvolvida para o procedimento o percentual admissível foi fixado em dois por cento da distância básica e, se atingido o limite de dez iterações, o ponto é aceito diretamente.

Para a fixação das geratrizes relativas aos pontos seguintes, o processo é análogo, adotando como incremento angular inicial o valor correspondente a cada ponto anterior. Os pontos são gerados até o primeiro valor de " α " que ultrapasse 180° . O ângulo correspondente a cada ponto gerado é armazenado.

Com os dois últimos pontos, anterior e posterior ao valor de 180° para " α ", determinam-se as distâncias ao ponto correspondente a 180° e considera-se o mais próximo. Através desta distância e do número de pontos gerados, corrige-se o valor básico adotado inicialmente para o espaçamento entre pontos de interseção. Todo o processo de geração é repetido com o novo valor. Determinado novamente o ponto final mais próximo ao ponto correspondente a 180° , a diferença entre 180° e o ângulo correspondente é distribuída proporcionalmente aos ângulos dos pontos, anteriormente armazenados, de modo que o último ângulo coincida com 180° . Os pontos da interseção são

então novamente determinados, através de geratrizes correspondentes aos ângulos corrigidos.

A realização do processo de geração uma única vez, com a correção apenas do desvio angular final, não é suficiente porque, apesar deste desvio ser pequeno e distribuído para todos os pontos, seu valor após o primeiro processo pode ser suficiente para provocar espaçamentos bastante diferentes.

Os demais pontos, de 180^0 a 360^0 , são determinados pela simetria do tubo no sistema global auxiliar respectivo. O plano de simetria contém os eixos "XA" e "YA" de modo que um ponto de coordenadas (XA, YA, ZA) corresponde ao ponto simétrico de coordenadas (XA, YA, -ZA).

O desenvolvimento matemático utilizado para a determinação da interseção das geratrizes dos tubos secundários com a superfície do tubo principal é apresentado no apêndice II.

Concluída a geração dos pontos de interseção de um tubo secundário, o procedimento é repetido para os demais tubos secundários da junta. Ao final da rotina as coordenadas dos pontos estão referidas ao sistema local da superfície desenvolvida do tubo principal.

III.3 - GERAÇÃO DOS PONTOS

III.3.1 - ESQUEMA BÁSICO

A etapa de geração dos pontos é a mais importante

do procedimento, uma vez que as características da malha de pendem diretamente de como os pontos foram posicionados. O processo, ao contrário de outros de geração aleatória, utiliza todos os pontos gerados para constituir a malha, não havendo uma seleção e descarte de pontos inadequados. A geração deve, por tanto, ser bastante criteriosa.

A rotina de geração dos pontos é única, tanto para o tubo principal como para os tubos secundários. As distinções necessárias são feitas internamente. O fluxograma da rotina é apresentado na figura III.4.

A idéia básica do processo consiste em considerar a superfície desenvolvida dos tubos discretizada através de um reticulado que a divide totalmente em quadrados iguais. Para cada quadrado é determinada a distância de seu centro ao ponto de interseção mais próximo. Em função desta distância, três situações e procedimentos são considerados: a distância é superior a um determinado limite: é gerado um ponto no centro do quadrado; a distância é inferior ao primeiro limite mas é superior a um segundo limite: são gerados dois pontos no quadrado em posições predefinidas; a distância é inferior ao segundo limite: o quadrado é dividido em quatro quadrados iguais. Para cada um desses subquadrados é determinada a distância de seu centro ao ponto de interseção mais próximo. O processo de análise é então repetido com outros valores para o primeiro e o segundo limites. Os quadrados vão sendo divididos em subquadrados, cada um dos quais pode originar outros quatro subquadrados e assim por diante. Um quadrado ou subquadrado

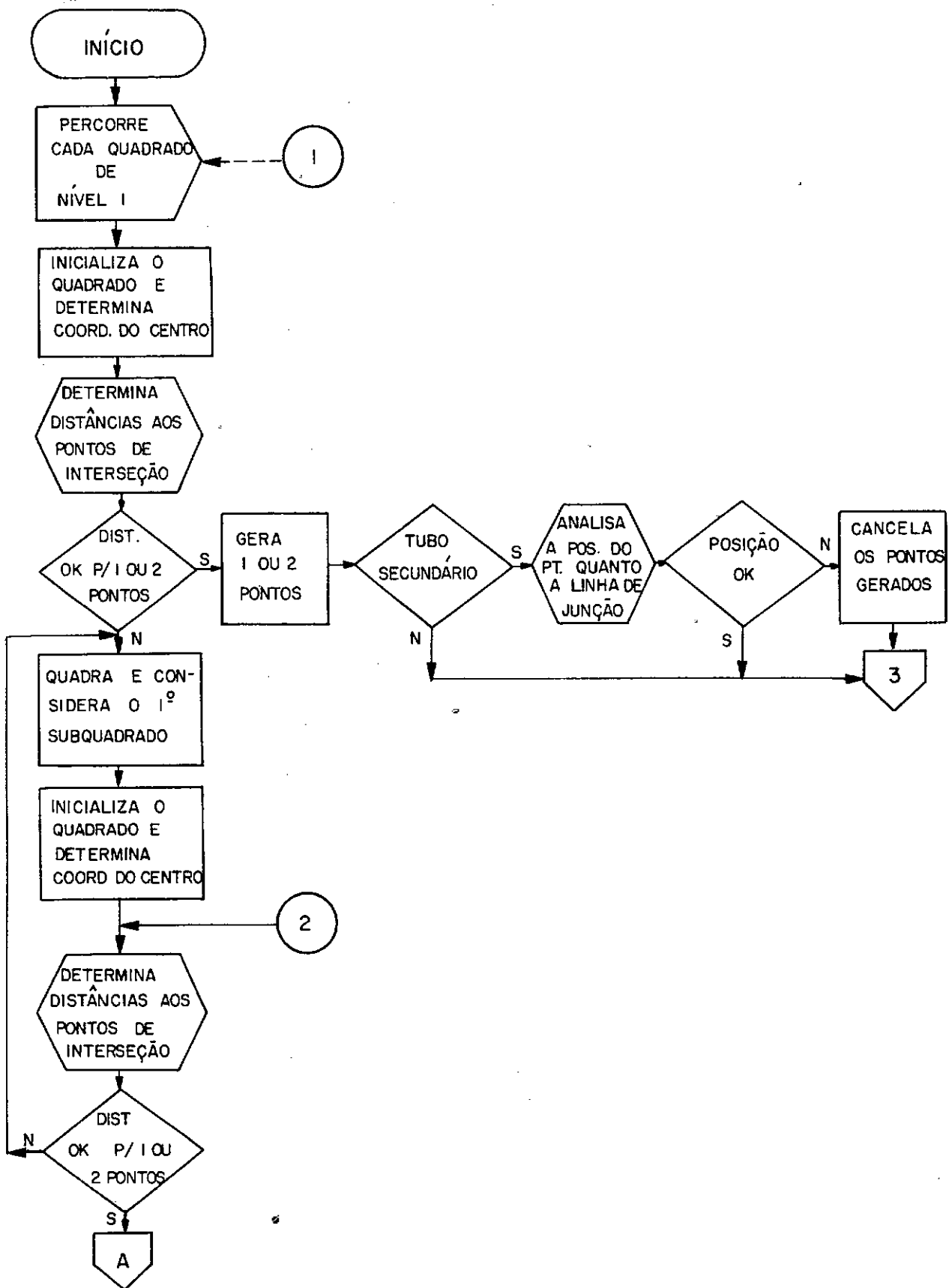


FIG. III. 4 - GERAÇÃO DOS PONTOS

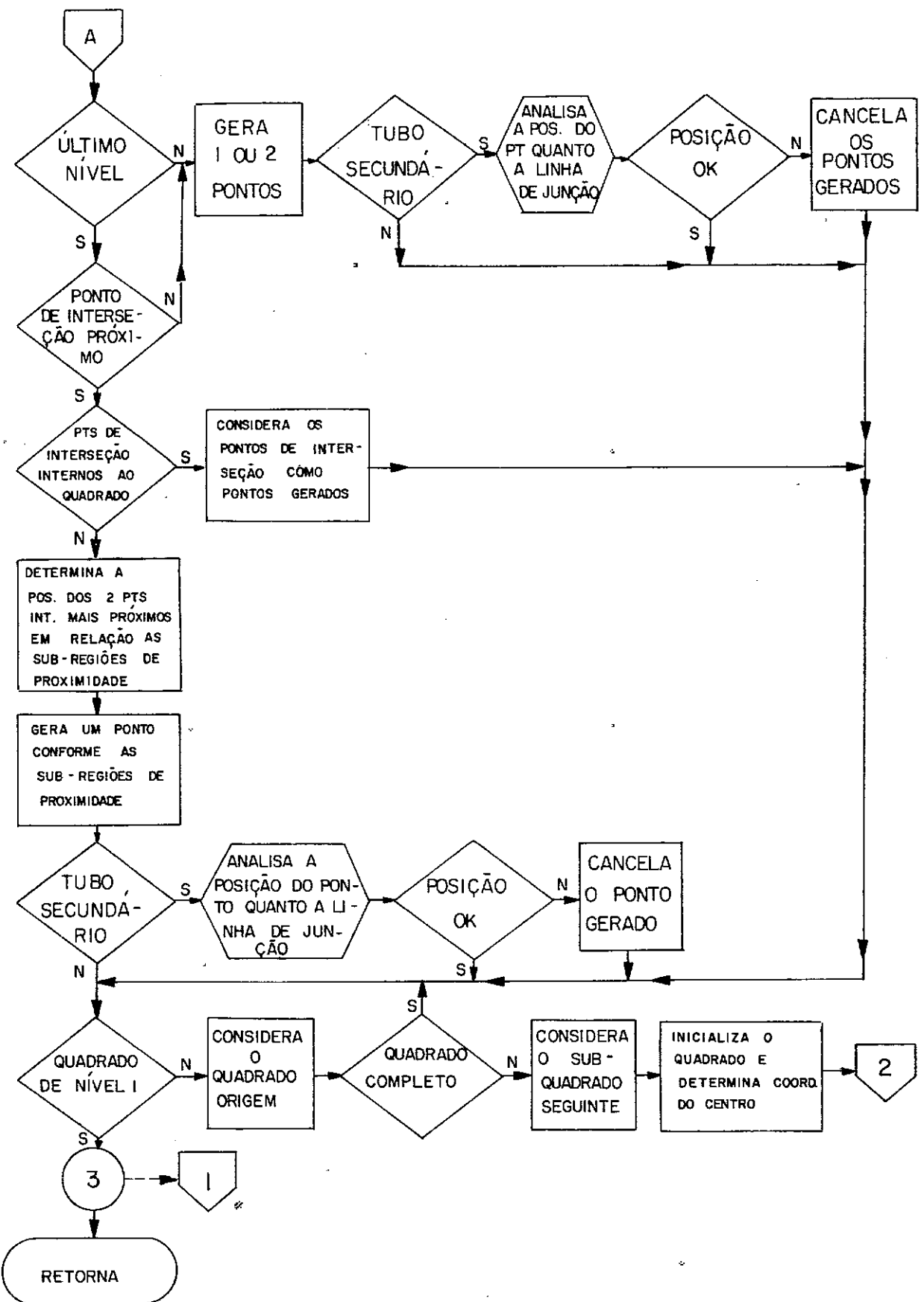


FIG. III.4 - (CONTINUAÇÃO)

é encerrado quando nele é gerado algum ponto.

O reticulado de quadrados iniciais da superfície desenvolvida é referenciado como uma disposição matricial de linhas e colunas. Cada fila de quadrados no sentido longitudinal do tubo constitui uma linha, e no sentido transversal, uma coluna.

Os quadrados e subquadrados são designados por níveis que indicam sua posição dentro do esquema de divisões sucessivas. A cada divisão os subquadrados resultantes são de nível superior em uma unidade em relação ao nível do quadrado do qual se originaram. Os quadrados do reticulado inicial são de nível 1, seus subquadrados são de nível 2 e assim sucessivamente.

Quando a distância do centro do quadrado sob análise ao ponto de interseção mais próximo é superior a certos limites, um ou dois pontos são gerados, concluindo o quadrado. O quadrado com pontos gerados é designado como quadrado final. O processamento retorna então ao último subquadrado ainda não analisado, continuando o processo. Completada a análise de toda a família de subquadrados originária de um quadrado inicial que tenha sido subdividido, o processo passa ao quadrado de nível 1 seguinte até a conclusão de todo o reticulado da superfície desenvolvida do tubo. Uma ilustração do esquema é apresentada na figura III.5, sendo indicado também o posicionamento para dois pontos em um quadrado.

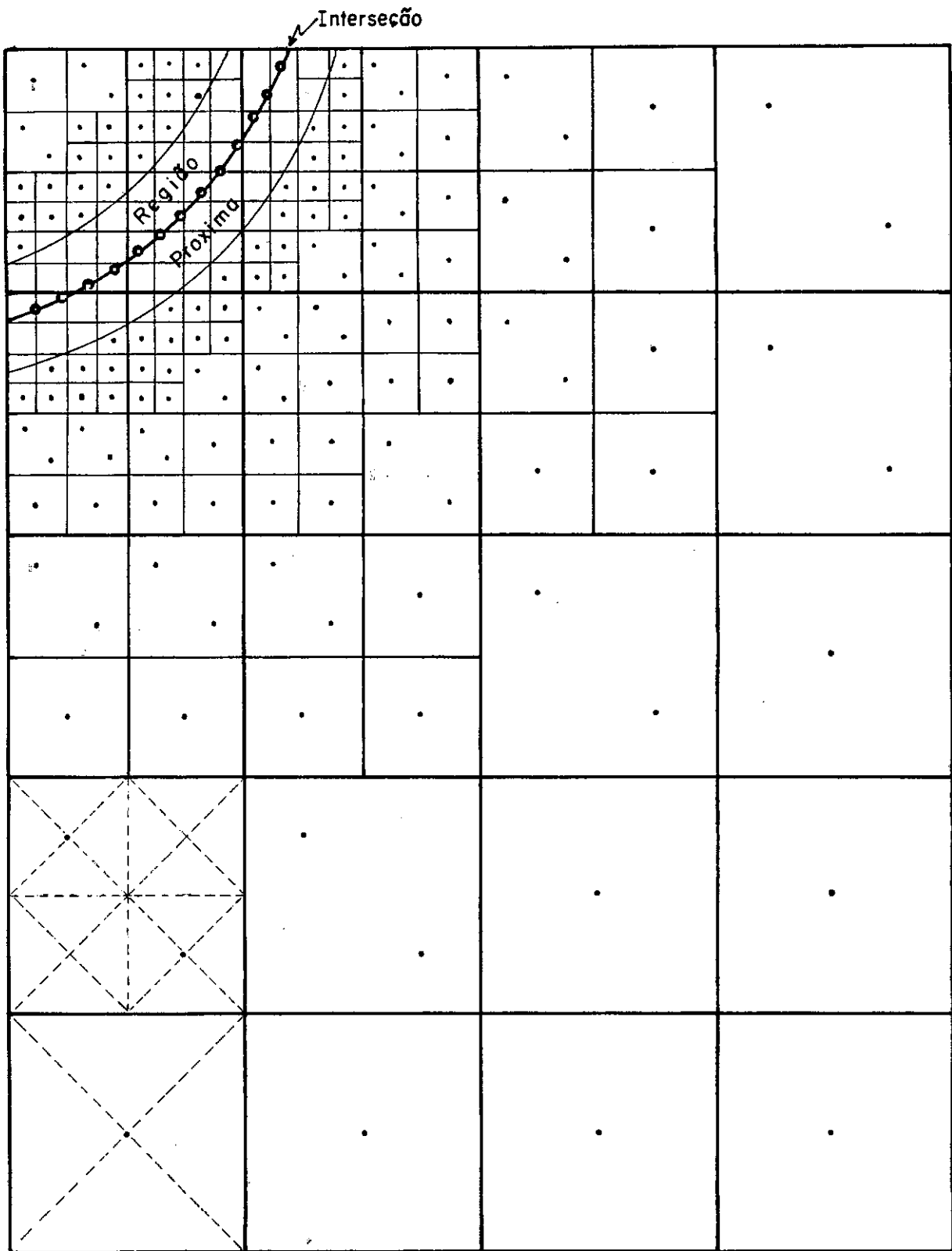


FIG. III. 5 — ESQUEMA DE GERAÇÃO DOS PONTOS

O processo de geração é realizado na superfície desenvolvida de cada tubo, considerando-se porém, na determinação das distâncias do centro de cada quadrado aos pontos das interseções, a situação real correspondente à continuidade física da superfície cilíndrica. Dois pontos aparentemente distantes na superfície desenvolvida podem na realidade estar próximos. As linhas que limitam longitudinalmente a representação da superfície correspondem no tubo a uma única geratriz, sendo fictício este limite. Dois pontos no tubo podem ser unidos por um lado ou pelo outro e, na determinação da distância mínima, os dois valores correspondentes são computados e comparados para cada cálculo de distância.

III.3.2 - DIMENSÃO DOS QUADRADOS

As dimensões dos lados dos quadrados do reticulado são computadas a partir do valor especificado pelo usuário para a distância básica entre os pontos sucessivos de uma interseção. Este valor é adotado como a dimensão inicial do lado do menor quadrado que será considerado na análise, ou seja, do quadrado de maior nível.

Como o lado de um quadrado de determinado nível tem o dobro do comprimento do lado do quadrado do nível seguinte, uma vez fixado o menor quadrado, todos os demais ficam definidos.

A equação III.1 determina o lado do quadrado de nível "i", " L_i ", sendo "n" o número de níveis e " L_n " o lado do

quadrado correspondente ao último nível.

$$L_i = 2^{(n-i)} L_n \quad (\text{eq. III.1})$$

A equação III.2 determina " L_i " a partir de " L_1 ", lado do quadrado de nível um, ou seja, do quadrado inicial.

$$L_i = L_1 / (2^{i-1}) \quad (\text{eq. III.2})$$

Como o reticulado dos quadrados iniciais deve cobrir exatamente toda a superfície desenvolvida de cada tubo, o valor inicial determinado para o lado do quadrado de nível um é ajustado para um valor mais próximo tal que o comprimento da circunferência da seção do tubo seja múltiplo do valor do lado, de modo a corresponder a um número exato de quadrados. A partir do valor ajustado para o nível um, efetua-se o proceso inverso, determinando os lados dos quadrados dos níveis seguintes.

No caso da superfície desenvolvida do tubo principal, outra ajustagem no lado do quadrado inicial é necessária, mas no sentido longitudinal, de modo a se ter um número inteiro de quadrados no comprimento especificado para o tubo. Como este comprimento não é necessariamente múltiplo ou submúltíplo do comprimento circunferencial, os lados dos quadrados serão ajustados diferentemente, e o reticulado do tubo principal será na realidade composto por retângulos, se bem que bastante próximos de quadrados. Para minimizar o afastamento da situação de quadrado, a segunda ajustagem é feita não so

bre o valor inicial, mas sobre o valor da primeira ajustagem, relativa ao comprimento circunferencial.

Para os tubos secundários apenas o ajuste transversal é realizado, não sendo necessário o ajuste longitudinal, conforme será detalhado na seção III.3.5. O reticulado é composto realmente por quadrados.

Conforme visto, a distância básica entre os pontos sucessivos de uma interseção é adotada como o valor inicial do lado do menor quadrado, definindo indiretamente também os lados dos demais quadrados. Variando-se o valor para a distância entre pontos de interseção e mantendo-se constantes os outros dados e características de um determinado problema, o número de quadrados variará e, conseqüentemente, também o nūmero de pontos gerados. A variação é para toda a superfície desenvolvida, afetando o refinamento da malha como um todo, mas não a gradação relativa dos elementos. A distância entre pontos de interseção é, portanto, o parâmetro básico para o controle do grau de refinamento global da malha de elementos.

Resumindo, a distância inicial básica entre pontos de interseção é o parâmetro fornecido pelo usuário. Esta distância determina o lado inicial do menor quadrado do reticulado e, indiretamente, o valor dos demais quadrados. O lado do maior quadrado é ajustado às características geométricas do tubo em questão. Com o valor ajustado têm-se o reticulado efetivamente empregado e os lados dos demais quadrados. No caso da superfície do tubo principal, os quadrados são na realizi

dade retângulos, devido à necessidade de duas ajustagens. O valor final empregado como distância básica entre pontos de interseção para a determinação das linhas de junção corresponde à média dos lados do menor retângulo do reticulado ajustado do tubo principal.

III.3.3 - GRADAÇÃO DA MALHA

A gradação é entendida como a variação na densidade de pontos e, portanto, no tamanho dos elementos em uma determinada malha. É a variação do refinamento ao longo da malha, não em termos globais de uma malha para outra, mas internamente a uma dada malha.

Os dados básicos, fornecidos pelo usuário, que determinam as características de gradação são o número de níveis que será adotado para o problema e os valores da tabela de distâncias que definem a geração de pontos ou a divisão em subquadrados. Tanto o número de níveis como a tabela referem-se a toda a junta e não a cada tubo.

O número de níveis influencia diretamente a suavidade com que a gradação se realiza, considerando-se o aspecto de continuidade. Quanto maior o número de níveis, mais contínua é a gradação da malha gerada.

A tabela de distâncias fixa para cada nível de quadrados os valores mínimos de distância acima dos quais são gerados um ou dois pontos. Assim, se a distância do centro

do quadrado sob análise ao ponto de interseção mais próximo for superior ao valor para um ponto, um ponto é gerado no centro; se inferior para um ponto mas superior para dois, dois pontos são gerados no quadrado nas posições indicadas na figura III.5; se inferior ao valor para dois pontos, o quadrado é dividido em quatro subquadrados iguais.

Os valores da tabela decrescem com o aumento no número do nível e com o aumento no número de pontos gerados em um nível (um ou dois pontos). Portanto, à medida que se aproximam de alguma linha de junção, os quadrados finais serão menores devido ao maior número de divisões em subquadrados, aumentando assim a densidade dos pontos gerados.

O quadrado de menor dimensão corresponde ao maior nível especificado. Estes quadrados correspondem à região junto às linhas das junções dos tubos, contendo inclusive os pontos de interseção. Não há, portanto, limite inferior de distância para o maior nível, e os valores correspondentes na tabela devem ser zero, tanto para um, como para dois pontos.

A passagem de um nível para outro é feita em função da distância ao ponto de interseção mais próximo, através da tabela de distâncias. Como um nível corresponde à geração de um ou dois pontos, cada nível está associado a duas densidades nodais. A gradação da malha consiste na distribuição das faixas de diferentes densidades na superfície do tubo. Esta distribuição e como é feita a transição entre faixas dependem dos valores especificados pelo usuário para a tabela de distâncias.

Para que a transição não seja brusca, recomenda-se que quadrados vizinhos, de lado comum, correspondam à geração de pontos com valores imediatamente vizinhos na tabela de distâncias, de modo que a transição seja feita por faixas de densidades nodais também vizinhas, sem pular uma faixa. Para que seja garantido que isto ocorra, preenchendo-se a tabela do maior nível para o menor, o valor de distância correspondente à geração de dois pontos em um quadrado de determinado nível deve diferir do valor relativo ao nível imediatamente superior para a geração de um ponto no mínimo de 0,790 L, com exceção do valor para dois pontos no penúltimo nível, onde é recomendado o mínimo de 1,118 L. Nas expressões, "L" é o lado do quadrado relativo ao nível em questão que está sendo preenchido. O valor correspondente à geração de um ponto deve diferir do valor para dois pontos no mesmo nível no mínimo de "L".

Uma transição ainda mais suave é obtida caso sejam considerados também os quadrados vizinhos pelo vértice, ou seja, quadrados com um vértice comum. Os valores anteriores passam a ser 1,061 L e 1,414 L, respectivamente. Entretanto, os testes realizados indicaram que esta consideração é desnecessária. Os valores anteriores dão bons resultados e, além disso, a orientação não é rígida, pois após a malha gerada as transições podem ser melhoradas pela rotina de regularização, que modifica ligeiramente a posição dos pontos. A regularização pode ser feita várias vezes, e o processo é bastante eficiente, melhorando sensivelmente as transições.

A utilização dos valores recomendados conduz a

malhas onde os pontos situados nas regiões de transição distam dos pontos vizinhos mais próximos, situados nas faixas de densidade diferente, em valores cuja relação varia de 1,1 a 1,4. Esta variação é compatível com o valor de 1,2 utilizado por GRESTE ⁽¹²⁾ comentado na seção II.2.

O número de níveis e a tabela de distâncias devem ser estabelecidos e compatibilizados de modo que os quadrados iniciais das colunas do reticulado que correspondem às extremidades laterais do tubo, ou seja, os quadrados da primeira e da última coluna, não sejam subdivididos e que correspondam à geração de um único ponto, posicionado no centro. O reticulado é disposto de tal maneira que o centro dos quadrados de nível um das colunas extremas esteja localizado sobre as seções-limite do tubo. Estes limites são representados pelos pontos gerados nos centros e, caso algum quadrado extremo fosse subquadrado ou tivesse dois pontos gerados, a representação não seria correta. Portanto, o usuário deve especificar uma tabela de distâncias onde o valor para a geração de um ponto no primeiro nível seja inferior à menor distância do plano das seções transversais extremas dos tubos da junta ao ponto de interseção mais próximo. Para os tubos secundários a consideração aplica-se apenas à extremidade oposta à junção.

III.3.4 - PROCEDIMENTO PARA PONTO PRÓXIMO

Conforme exposto, a região próxima às junções dos tubos corresponde ao menor subquadrado utilizado, relativo ao maior nível especificado. O menor subquadrado engloba inclu

sive os próprios pontos de interseção. Como a posição destes pontos não tem qualquer relação com o reticulado de quadrados, a geração de pontos com a mesma estratégia utilizada para os outros níveis não é adequada, pois poderia conduzir a pontos localizados muito próximos de pontos de interseção e, portanto, a elementos finitos muito irregulares. Assim, um procedimento diferente é utilizado quando o ponto que está sendo gerado é vizinho de algum ponto de interseção.

Os quadrados de último nível correspondem à geração de um único ponto e não a um ou dois, como nos outros níveis. O ponto é localizado inicialmente no centro do quadrado, e sua distância ao ponto do quadrado vizinho, também de último nível, corresponde ao lado do quadrado. Pontos de interseção consecutivos distam entre si de um valor aproximadamente igual também ao lado do quadrado, uma vez que este valor foi utilizado como dado básico inicial para fixação das dimensões dos quadrados, partindo do último nível. O objetivo do procedimento em questão é posicionar os pontos gerados em relação aos pontos de interseção próximos, de modo que todos os pontos da vizinhança estejam aproximadamente eqüidistantes, conduzindo assim a elementos finitos de forma regular.

O ponto que está sendo gerado é considerado como próximo a pontos de interseção quando a distância do centro do quadrado de último nível em questão ao ponto de interseção mais próximo é igual ou inferior a $1,5 L$, sendo " L " o valor do lado do quadrado.

Os pontos de interseção não podem ser deslocados, uma vez que representam as linhas de junção dos tubos. Considera-se, então, a geração dos pontos próximos em outras posições, também prefixadas, procurando a mais adequada e não se limitando apenas ao centro dos quadrados. As posições analisadas estão indicadas na figura III.6.

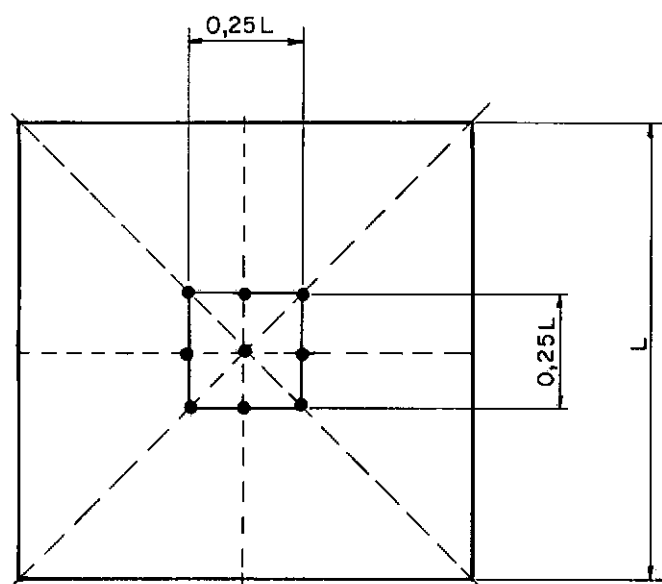


FIG. III. 6 - POSIÇÕES DE GERAÇÃO PARA PONTO PRÓXIMO

Duas situações são consideradas no procedimento, correspondendo a pontos de interseção internos ou não ao quadrado que está sendo analisado.

No caso de algum ponto de interseção estar localizado no interior do quadrado sob análise, não é criado um no

vo ponto. O ponto de interseção é considerado como ponto gerado, mantendo sua posição. Até dois pontos de interseção podem estar no interior de um quadrado. Como o reticulado de quadrados cobre toda a superfície do tubo, no final do processo todos os pontos de interseção serão considerados como pontos gerados, pertencentes a determinados subquadrados. A situação do ponto de interseção estar localizado exatamente sobre um lado comum a dois quadrados vizinhos é prevista no procedimento.

Quando o ponto de interseção é vizinho, mas não interno ao quadrado, é gerado um único ponto em uma das posições predefinidas. Na fixação desta posição são analisadas as distâncias aos dois pontos de interseção mais próximos e não apenas ao primeiro mais próximo.

A região de proximidade, tendo como limite a distância de $1,5 L$ do centro do quadrado, sendo " L " o seu lado, é dividida em três sub-regiões. A primeira, com distância até $0,75 L$, a segunda, com distância de $0,75 L$ até $1,25 L$ e a terceira, de $1,25 L$ até $1,5 L$ (figura III.7). Vários casos são considerados em função das regiões em que os dois pontos de interseção mais próximos estejam localizados, visando determinar a mais adequada entre as posições disponíveis para a geração. Na descrição a seguir o primeiro ponto de interseção mais próximo é denominado como ponto 1 e o segundo mais próximo como ponto 2.

Estando o ponto 1 na primeira região, se o ponto 2

estiver também nesta região, a posição escolhida para a geração é aquela cuja soma das distâncias aos pontos 1 e 2 é máxima. Se o ponto 2 estiver na segunda região, é escolhida a posição correspondente à maior distância do ponto 1, com a limitação de que a distância ao ponto 2 não difira mais que 10% da distância do centro do quadrado ao próprio ponto 2. Se o ponto 2 estiver na região 3, é escolhida a posição cuja diferença entre a distância ao ponto 2 e a distância ao ponto 1 é mínima. Se o ponto 2 estiver além da região 3, a posição é aquela de distância ao ponto 1 máxima.

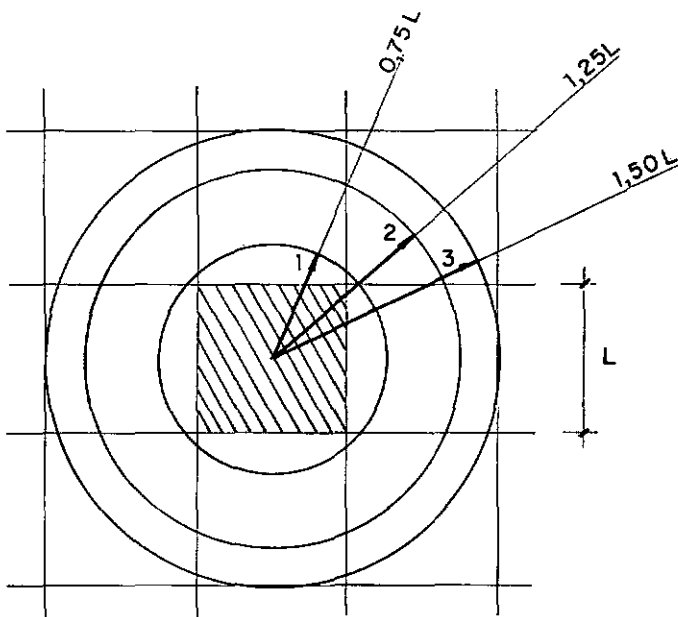


FIG. III. 7 - SUB-REGIÕES DE PROXIMIDADE

Com o ponto 1 na região 2, se o ponto 2 estiver também na mesma região, o ponto é gerado no centro do quadrado. Se o ponto 2 estiver na região 3, a posição é de distância mínima ao ponto 2, com a limitação de que a distância ao ponto 1 não difira mais que 10% da distância do centro do quadrado ao próprio ponto 1. Se o ponto 2 estiver além da região 3, o ponto é gerado no centro do quadrado.

Se o ponto 1 estiver na região 3 e o ponto 2 também, a posição é aquela cuja soma das distâncias aos pontos 1 e 2 é mínima. Se o ponto 2 estiver além da região 3, o ponto escolhido é o de distância mínima ao ponto 1.

A análise da posição dos dois pontos de interseção mais próximos, e não apenas do primeiro, a consideração das sub-regiões de proximidade e das diversas situações possíveis são necessárias, de modo a evitar que seja escolhida uma posição de geração adequada para o ponto de interseção mais próximo, mas que prejudique sensivelmente o posicionamento relativo ao segundo ponto de interseção mais próximo. A fixação das sub-regiões e das posições possíveis de geração foi estabelecida após vários testes que conduziram aos valores e critérios adotados pelo procedimento.

III.3.5 - TUBOS SECUNDÁRIOS

A diferença fundamental para a geração dos pontos nos tubos secundários deve-se ao fato de que, diferentemente do tubo principal, onde as duas extremidades correspondem a

seções transversais, o contorno da extremidade relativa à junção não é regular, devido ao acoplamento entre os tubos. O contorno irregular impede que o seu limite coincida com o limite do reticulado de quadrados iniciais da superfície desenvolvida, sendo necessário um procedimento específico.

A partir das coordenadas no sistema local da superfície desenvolvida dos pontos de interseção do tubo secundário sob análise, são determinadas a menor e a maior coordenada "x" da interseção. O número de colunas no arranjo matricial dos quadrados de nível um do reticulado, ou seja, o número de quadrados iniciais na direção longitudinal do tubo, é determinado pelo comprimento entre o ponto de menor coordenada "x" e a extremidade oposta à junção, considerando-se o valor do lado do quadrado inicial e tomando-se o número inteiro superior. O lado do quadrado é previamente calculado em função do comprimento da circunferência da seção transversal, de modo análogo ao empregado para o tubo principal.

O número de quadrados iniciais na direção longitudinal fixa as seções-limite do reticulado. Como o seu comprimento é que foi ajustado ao lado do quadrado e não o inverso, como no tubo principal, os elementos são de fato quadrados e não retângulos.

O comprimento longitudinal do reticulado é superior ao comprimento real do tubo secundário, englobando portanto a linha de junção, representada pelos pontos de interseção. A região correspondente às coordenadas "x" inferiores às da li

nha de junção não tem significado físico, e os pontos gerados nesta região devem ser descartados.

O processo de geração de pontos é o mesmo do tubo principal. A verificação da região em que o ponto foi gerado consiste em considerar dois pontos de interseção de coordenadas "y", imediatamente superior e inferior à do ponto gerado, e determinar em que lado do segmento definido pelos dois pontos de interseção está o ponto em questão. Se a coordenada "x" do ponto gerado é superior à maior coordenada da interseção, determinada anteriormente, a verificação da região não é necessária, e o ponto é aceito diretamente.

III.4 - TRIANGULARIZAÇÃO DA MALHA

Para a composição da malha todos os pontos gerados são utilizados na formação dos elementos. Cada elemento é definido pelo estabelecimento de sua conectividade, ou seja, pela fixação ordenada de seus pontos constituintes.

O procedimento em questão gera elementos triangulares com pontos localizados nos vértices. A triangularização é feita com base no eficiente esquema apresentado por NELSON (13). Modificações foram introduzidas na programação original de modo a tirar proveito das características do método de geração dos pontos e dos aspectos específicos da aplicação para juntas tubulares.

O método de geração através de coordenadas isoparamétricas

tricas é bastante eficiente para problemas com regiões de contornos regulares. Entretanto, devido à grande variação na forma das linhas de junção dos tubos em função dos vários parâmetros geométricos das juntas, o problema em questão apresenta características de domínios irregulares e arbitrários onde a maioria dos métodos não dão bons resultados, não tendo a necessária flexibilidade.

O algoritmo empregado é específico para domínios arbitrários e tem uma importante vantagem sobre outros do tipo, por não ser necessário verificar a cada novo elemento gerado a ocorrência de superposição com elementos anteriores. Esta vantagem é bastante sensível, e a economia de tempo advinda é substancial.

O aspecto mais importante de um problema de triangularização reside no estabelecimento de um critério que, considerando um lado de triângulo formado por dois pontos, defina o terceiro ponto como o mais adequado no conjunto de pontos candidatos.

O algoritmo utilizado considera que, de todos os pontos situados de um lado de uma linha-base definida por dois pontos, o ponto que resulta numa triangularização mais adequada é aquele cujo centro da circunferência passando pelos três pontos dista do valor mínimo da linha-base. Este valor é afetado por sinal, sendo tomado como positivo ou negativo em relação à linha-base, caso o centro esteja localizado, respectivamente, no lado dos pontos considerados ou no lado oposto.

A triangularização é iniciada a partir de um segmento de contorno tomado como lado-base. A cada triângulo gerado, dois novos lados são produzidos. Um é tomado como lado-base do triângulo seguinte, e outro é armazenado numa pilha de lados ainda não utilizados como base. Verifica-se a seguir se o novo lado-base já faz parte simultaneamente de dois triângulos. Em caso afirmativo, o lado é descartado, e o elemento superior da pilha passa a ser considerado como o novo lado-base, sendo submetido à mesma verificação. O processo é encerrado quando a pilha é esgotada. A malha terá sido, então, toda triangularizada.

Os elementos obtidos pelo algoritmo apresentam boas características, pois tendem automaticamente para o triângulo equilátero, dentro naturalmente das possibilidades, em função da localização dos pontos. Como na aplicação em questão os pontos estão aproximadamente eqüidistantes dos seus vizinhos, a triangularização é muito eficiente, e as malhas obtidas a tendem perfeitamente.

A conectividade é obtida para cada elemento, relacionando seus pontos no sentido anti-horário.

O número de elementos gerados pelo algoritmo em uma superfície é determinado pela equação III.3 a seguir, onde "NE" é o número de elementos, "NP" é o número total de pontos, "NC" é o número de contornos-limite e "NPC" é o número de pontos de contorno.

$$NE = 2 (NP - 2 + NC) - NPC \quad (\text{eq. III.3})$$

Na aplicação para juntas tubulares, a triangularização é feita individualmente por tubo. O número de contornos-limite é sempre dois, seja no tubo principal ou em tubo secundário, correspondendo às linhas que estabelecem as extremidades do tubo. São as seções-limite do tubo principal e a seção final e a linha de interseção (boca-de-lobo), no caso de tubo secundário. A variável "NPC" é o número de pontos que definem as linhas-limite e "NP" é o número total de pontos de cada tubo. O número de elementos é dado, então, pela equação III.4.

$$NE = 2 \cdot NP - NPC \quad (\text{eq. III.4})$$

A principal modificação introduzida no algoritmo refere-se ao conjunto de pontos candidatos considerado na triangularização de cada elemento. Ao invés de se considerarem todos os pontos do domínio, são analisados apenas os pontos pertencentes aos quadrados de nível 1 ou 2, circunvizinhos aos dois pontos tomados como lado-base. O ganho de eficiência é sensível, pois um grande número de verificações não é mais realizado. Restringiu-se aos níveis 1 e 2 porque, para níveis superiores, a identificação de quadrados vizinhos torna-se complexa, consumindo tempo e não sendo mais compensadora.

Sendo a aplicação em juntas tubulares, a geração é efetuada na superfície planificada de cada tubo, desenvolvida a partir de uma geratriz predefinida, como já comentado anteriormente. Modificações foram realizadas no algoritmo de triangularização de modo que os limites longitudinais da superfície

fície, correspondentes à geratriz de abertura, não introduzis sem qualquer limitação lógica na formação dos elementos. Na situação real há continuidade física da superfície cilíndrica, e os pontos de um elemento podem estar situados em lados opostos da geratriz.

Outras modificações foram introduzidas para que, no caso do tubo principal, os pontos de interseção consecutivos que definem as linhas de junção dos tubos secundários correspondessem dois a dois a lados de elementos, impedindo a formação de elementos com lados interceptando linhas de junção. Para os tubos secundários isto não é necessário, pois a linha de junção é um dos limites do tubo.

O fluxograma da rotina de triangularização é apresentado na figura III.8. Ao contrário de outros procedimentos, a triangularização do tubo principal é realizada diretamente em toda a superfície desenvolvida, não tratando separadamente as regiões internas às linhas de junção.

III.5 - REGULARIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS MALHAS GERADAS AUTOMATICAMENTE

O procedimento de regularização da malha de elementos gerados consiste em substituir as coordenadas de cada ponto pela média das coordenadas dos pontos vizinhos, a ele diretamente conectados através de lados de elementos. Os pontos são assim ligeiramente deslocados de sua posição original, sendo logicamente acompanhados pelos elementos cujo formato é modificado.

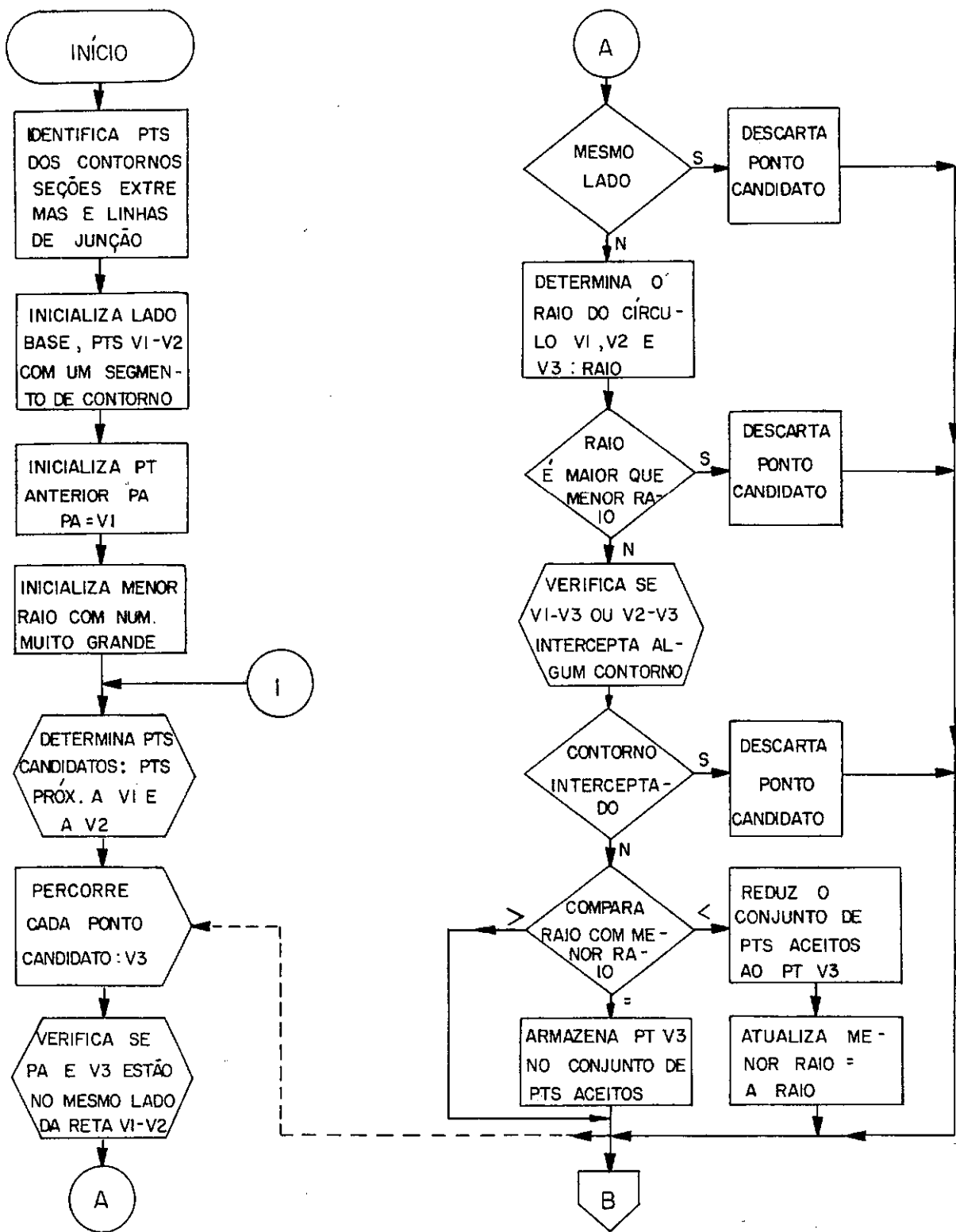


FIG. III. 8 - TRIANGULARIZAÇÃO DOS PONTOS

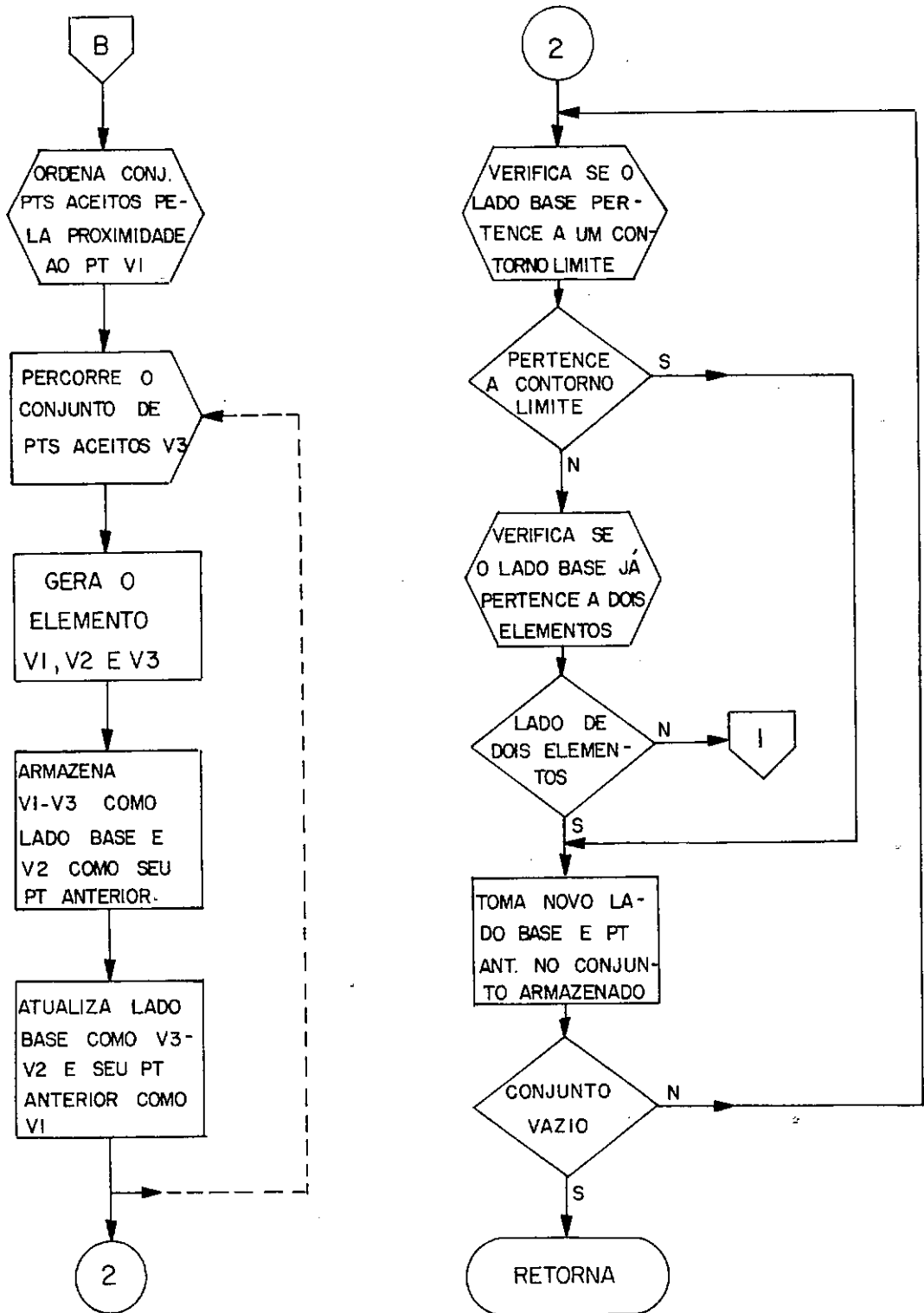


FIG. III 8 - (CONTINUAÇÃO)

O procedimento é eficiente e válido. Obtêm-se sensível melhora na equilateralidade dos elementos e principalmente na uniformidade e continuidade com que é feita a gradação de densidade ao longo da malha. No aspecto global as malhas tornam-se mais homogêneas.

A regularização é uma etapa posterior à geração da malha de cada tubo. Pode ser aplicada diversas vezes, sendo o número de iterações fixado pelo usuário. A primeira regularização é, entretanto, a que produz maiores modificações, conduzindo praticamente ao posicionamento final. A especificação de duas ou três iterações é mais do que suficiente, pois as modificações seguintes são desprezíveis.

Pesquisou-se a validade de se considerar no cálculo da média das coordenadas, para a determinação da nova posição de cada ponto, não apenas as coordenadas dos pontos vizinhos, mas também as coordenadas do próprio ponto. O objetivo era obter uma modificação mais gradual, talvez com melhores resultados. Os testes foram realizados considerando-se as coordenadas do ponto com peso 1, 1,5 e 2 no cálculo da média. Os resultados obtidos nas malhas geradas não foram, entretanto, superiores, concluindo-se pela consideração apenas dos pontos vizinhos.

Para comparação e avaliação das malhas geradas, dois parâmetros foram estabelecidos, tendo como base a consideração de que uma malha ideal seria composta por triângulos equiláteros. É uma situação ideal, uma vez que qualquer gradação

obriga a uma variação no tamanho dos elementos que, na composição para a formação da malha, seriam obrigatoriamente não-equiláteros.

Outro aspecto a se considerar é o fato de que o Método dos Elementos Finitos não exige que os elementos sejam polígonos regulares, devendo ser evitados apenas elementos excessivamente alongados e distorcidos. Apesar destas considerações, os parâmetros são válidos, pois permitem avaliações qualitativas e a realização de comparações.

O primeiro parâmetro indica o desvio do pior elemento da malha em relação à situação de triângulo equilátero. O elemento é identificado, permitindo uma verificação visual na plotagem. O segundo parâmetro corresponde à média do desvio de todos os elementos da malha, dando assim uma idéia da qualidade global.

O desvio em relação a um triângulo equilátero é determinado através da equação III.5, utilizada também por ELLWANGER⁽¹⁴⁾. Nesta equação, "D" é o desvio, "L" é o maior lado do triângulo e "H" é a altura relativa ao maior lado. Para um triângulo equilátero o resultado é nulo.

$$D = H/L - 0,866 \quad (\text{eq. III.5})$$

Os parâmetros de desvio são calculados após a geração da malha de cada tubo, antes de qualquer regularização posterior, e após cada uma das regularizações especificadas, possibilitando verificar as melhorias obtidas em cada iteração.

III.6 - ASPECTOS COMPUTACIONAIS. ESTRUTURA DE DADOS.

Foram descritas nos itens anteriores apenas as rotinas principais, de maior interesse, correspondentes a cada etapa do procedimento desenvolvido, devendo-se incluir a rotina de plotagem após a etapa de regularização da malha gerada. Esta rotina é responsável pela geração dos códigos para o *plotter*. Os fluxogramas apresentados são gerais, não incluindo detalhes.

Além das rotinas principais, tem-se ainda uma série de rotinas auxiliares, tais como: rotinas de mudança de sistema de coordenadas; rotina de determinação de distâncias do centro de um quadrado aos dois pontos de interseção mais próximos; rotina de verificação se um ponto gerado em um tubo secundário não se situa além do limite correspondente à linha de junção, devendo portanto ser descartado; rotina de determinação do raio do círculo definido por três pontos dados; rotina de verificação se dois pontos se situam no mesmo lado de uma reta definida por outros dois pontos; rotina de determinação da posição relativa de dois pontos em função da geratriz de abertura da superfície desenvolvida; rotina de identificação dos quadrados de níveis um e dois vizinhos de um subquadrado de qualquer nível de um dado ponto; rotina de identificação dos pontos gerados em subquadrados originários de um dado quadrado de nível um ou dois; rotina de determinação dos parâmetros de avaliação da malha, considerando-se o desvio da situação de triângulo equilátero; rotina de identificação de erros.

Uma das rotinas auxiliares mais importantes refere-se à determinação da posição relativa de dois pontos quanto à geratriz de abertura da superfície desenvolvida. É utilizada diversas vezes, tendo em vista que basicamente todo o processo de geração é realizado na superfície desenvolvida dos tubos, considerando-se a continuidade física da situação real da superfície cilíndrica. A rotina indica se os dois pontos estão mais próximos quando considerados no outro sentido que não o aparente na superfície desenvolvida. Em caso afirmativo, é feita uma modificação na coordenada "y" do sistema da superfície desenvolvida, invertendo a posição relativa de um dos pontos quanto à geratriz de abertura.

Os procedimentos de geração automática de malhas do tipo aleatório, com contornos arbitrários, entre os quais o procedimento desenvolvido pode ser classificado, requerem normalmente um grande número de operações e testes, conduzindo a elevados tempos de processamento. É uma característica dos procedimentos, em contrapartida à grande flexibilidade obtida.

Na programação computacional do procedimento desenvolvido, procurou-se reduzir o tempo de execução, diminuindo o número de testes e operações necessários.

Foi utilizado para a triangularização dos pontos o algoritmo proposto por NELSON ⁽¹³⁾, que, ao contrário de outros algoritmos, não exige, a cada novo elemento gerado, a verificação da ocorrência de superposição com os elementos anteriores. O aumento de eficiência é considerável, principalmente

para malhas com um número razoável de elementos.

A programação original do algoritmo pesquisava a totalidade dos pontos do domínio para formação de cada elemento, visando determinar o mais adequado. Foram introduzidas modificações de modo a considerar como pontos candidatos à triangularização apenas os pontos pertencentes aos quadrados de nível um ou dois vizinhos dos dois pontos tomados como lado-base para o novo elemento. Evita-se assim um grande número de testes e operações desnecessários, uma vez que fatalmente o ponto escolhido será um ponto vizinho. Consideram-se como quadrados vizinhos aqueles com um lado ou um vértice comum. Limita-se aos níveis um e dois, pois a consideração de vizinhança em níveis mais elevados pode ser complexa, com um tempo elevado para sua determinação, anulando a vantagem do processo.

O esquema de identificação dos pontos vizinhos é viável devido à estrutura do reticulado de quadrados e subquadrados derivados, onde as posições relativas são conhecidas. A identificação dos quadrados vizinhos e a determinação dos pontos pertencentes a cada quadrado identificado são realizadas pelas rotinas auxiliares específicas.

Considerando-se toda a programação desenvolvida, é possível identificar ainda dois procedimentos que demandam razoável tempo de execução. O primeiro faz parte da rotina de triangularização e corresponde a verificar, para cada novo lado tomado como base de um novo triângulo, se ele já é lado de dois elementos gerados anteriormente, necessitando-se para isso pes

quisar todos os elementos já gerados. Não se visualisa, a princípio, uma forma de reduzir este número de testes.

O outro procedimento faz parte da rotina de regularização da malha. Corresponde à montagem de um vetor que identifica, para cada ponto da malha, os pontos a ele conectados através de lados de elementos. Para cada ponto necessita-se percorrer todos os elementos gerados, verificando a conectividade. As informações são armazenadas de modo a estarem disponíveis para as regularizações seguintes, que não mais consomem o tempo correspondente. Uma possibilidade de melhoria pode ser a montagem do vetor diretamente na etapa de triangularização, armazenando as informações à medida que os elementos vão sendo gerados.

Ainda com relação ao tempo de execução, a programação não utiliza áreas de trabalho em memória auxiliar, evitando o tempo de operações de transferência de dados. Opera-se a princípio apenas com a memória direta. De modo a não ser necessária uma região de processamento muito grande, as variáveis inteiras são especificadas como de comprimento de dois *bytes*. O vetor de pontos vizinhos utilizado na etapa de regularização é colocado na mesma área correspondente às informações dos quadrados e subquadrados, não mais necessárias após a regularização. A geração é realizada para cada tubo da junta, conservando apenas os dados básicos e liberando as áreas comuns.

O número de quadrados iniciais que compõem o reticula

do da superfície desenvolvida de cada tubo é completamente variável, e o número de subquadrados originários de um quadrado inicial também é desconhecido antes da geração. Uma estimativa de valores para fixação de áreas de memória seria extremamente ineficiente e limitante.

A rotina de geração dos pontos utiliza uma estrutura de dados adequada ao problema. Todas as informações relativas à totalidade dos quadrados e subquadrados, correspondentes à superfície desenvolvida de um tubo, são armazenadas em uma única matriz. As posições iniciais estão associadas aos quadrados iniciais de nível um. As posições seguintes relacionam-se aos subquadrados e são preenchidas à medida que eles vão sendo subdivididos.

Como já citado, a posição dos quadrados iniciais corresponde a um arranjo de linhas e colunas. As linhas são no sentido longitudinal do tubo, e sua numeração é feita no sentido inverso ao do eixo local "y" da superfície. As colunas são transversais ao tubo e numeradas no sentido do eixo lo-cal "x" da superfície.

Cada posição na matriz de dados corresponde a um quadrado ou subquadrado cujo número de identificação é o número da posição correspondente ao primeiro índice da matriz. A matriz é bidimensional e o segundo índice vai de um a sete, de modo que cada quadrado tem sete dados de informação. O primeiro é o nível do quadrado, o segundo indica o número do quadrado cuja subdivisão originou o quadrado em questão, e o ter

ceiro informa a posição no quadrado-origem. Se o quadrado é de nível 1, o segundo e terceiro dados são, respectivamente, a linha e a coluna no reticulado de quadrados iniciais. Os quatro dados seguintes contêm a identificação numérica dos subquadrados em que o quadrado em questão tenha sido subdividido, por ordem de numeração da posição dos subquadrados. Caso o quadrado seja final, ou seja, não tenha sido subdividido, o quarto dado contém o primeiro ponto gerado, e o quinto, o segundo ponto, caso exista. As demais posições são zeradas, informando que os dois dados anteriores referem-se a pontos e não a subquadrados.

A estrutura de dados possibilita recuperar qualquer informação relativa a todo o processo de divisões em quadrados. A partir de qualquer subquadrado ou de um ponto gerado pode-se retornar ao quadrado inicial, determinar quadrados ou subquadrados vizinhos a posições determinadas e calcular coordenadas do centro.

A estrutura é complementada e correlacionada aos pontos gerados através de um vetor auxiliar que indica para cada ponto gerado o número do quadrado final a que ele pertence. Este vetor é também preenchido a cada ponto gerado. Assim, tendo-se o ponto, chega-se ao quadrado, e no quadrado têm-se os pontos gerados.

CAPÍTULO IV

MANUAL DO USUÁRIO DO PROGRAMA "GEMAT"

IV.1 - INTRODUÇÃO

A versão inicial do programa de geração automática de malhas de elementos finitos triangulares planos para juntas tubulares, "GEMAT", é aplicável a todo tipo de junta, desde que sem superposição de membros secundários e sem reforços. Não há outras restrições, podendo-se abordar qualquer configuração geométrica.

A programação foi realizada em linguagem FORTRAN, nível H e implementada em computador IBM/370.

O processamento é feito exclusivamente em memória real. É necessária uma área de 320 K *bytes* para a capacidade de análise implantada, descrita a seguir em termos de valores-limite máximos:

- Tubos secundários: 10
- Pontos de interseção: 700 (para toda a junta)
- Níveis de quadrados: 5
- Número de quadrados e subquadrados por tubo: 5000
- Pontos gerados por tubo: 3000
- Elementos gerados por tubo: 6000

Quanto aos sistemas de coordenadas utilizados, o usuá

rio tem contacto com o sistema global do problema e com o sistema local da superfície desenvolvida de cada tubo.

a) *Sistema Global*

Todos os dados de entrada, correspondendo ao fornecimento da geometria da junta, são feitos no sistema global de coordenadas.

É um sistema cartesiano direto tridimensional, (X, Y, Z) , estabelecido pelo usuário. Tem como única restrição o fato de que o eixo "X" deve coincidir com a linha de centro do tubo principal da junta.

b) *Sistema local de cada tubo secundário*

Este sistema tem interesse para a interpretação da plotagem das superfícies dos tubos secundários. A plotagem é feita considerando-se a superfície desenvolvida dos tubos, sendo a geratriz de abertura fixada neste sistema.

Trata-se de um sistema cartesiano direto tridimensional, (X_T, Y_T, Z_T) , para cada um dos tubos secundários. Cada sistema tem origem no ponto de interseção do eixo do tubo secundário com o eixo do tubo principal. O eixo "X_T" coincide em direção e sentido com o eixo do tubo secundário. O eixo "Y_T" está contido no plano definido pelas linhas de centro do tubo principal e do tubo secundário, e seu sentido é tal que sua projeção sobre a linha de centro do tubo principal

tem o sentido contrário ao do eixo "X" do sistema global. Considera-se o eixo do tubo secundário como sendo orientado da linha de junção para a outra extremidade.

Tendo em vista a especificação dos dados de entrada relativos à gradação e ao refinamento da malha e objetivando uma compreensão do procedimento básico empregado pela programação para a geração dos pontos, é apresentada a seguir uma descrição sumária do esquema adotado.

Inicialmente as linhas de junção dos tubos da junta são determinadas por meio de pontos, denominados pontos de interseção.

Para a geração dos pontos da malha a programação considera na superfície desenvolvida de cada tubo um reticulado que a divide totalmente em quadrados iguais. Para cada quadrado é determinada a distância de seu centro ao ponto de interseção mais próximo. Caso esta distância seja superior a um determinado limite, é gerado um ponto no centro do quadrado. Se a distância for inferior ao primeiro limite mas superior a um segundo, são gerados dois pontos. Caso a distância seja inferior ao segundo limite, o quadrado é dividido em quatro quadrados iguais, repetindo então a determinação e análise da distância. Cada subquadrado pode originar outros quatro subquadrados e assim por diante, o que se encerra com a geração de algum ponto.

Os quadrados e subquadrados são designados por níveis.

A cada subdivisão os quadrados resultantes são de um nível a cima do quadrado-origem. Os quadrados do reticulado inicial são de nível um.

A gradação interna da malha depende diretamente da especificação do usuário para o número de níveis e para a tabela de distância que determina a geração de pontos ou a subdivisão em subquadrados.

O menor subquadrado, ou seja, o de maior nível, tem como lado o mesmo valor especificado pelo usuário para o espaçamento entre os pontos de interseção. Este valor controla o grau de refinamento global da malha.

IV.2 - DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada correspondem ao fornecimento de quatro tipos de informações: título e identificação do problema, opções de plotagem, descrição da geometria da junta e dados referentes ao refinamento e gradação da malha.

A programação não interfere nas unidades dos valores fornecidos. A unidade de comprimento a ser utilizada em determinada aplicação é de consideração do usuário, devendo ser a mesma para todos os dados e para a interpretação dos resultados. Os valores de ângulos devem ser unicamente fornecidos em graus, na forma decimal.

A entrada é feita em formato cartão. O formato é fixo,

uma vez que a massa de dados é reduzida. Têm-se sete tipos de cartões, obrigatoriamente presentes, cuja sequência e formato constam da figura IV.1, sendo comentados a seguir.

1) Um único cartão título

Contém o título, identificação e informações relativas ao problema, a critério do usuário.

Os caracteres são alfanuméricos, podendo ocupar toda a extensão do cartão.

O conteúdo é indicado nos cabeçalhos das plotagens e da saída da impressora.

2) Um único cartão relativo a arquivos de saída e a opções de plotagem

Contém quatro dados, "IARQS", "IARQP", "IPOT" e "SCAL", os três primeiros inteiros e o quarto real, no formato (3I5, 5X, F10.4).

a) "IARQS" - coluna 1 a 5, inteiro

Contém a identificação numérica "FORTRAN" para o arquivo de saída em formato cartão.

Dependendo da especificação do usuário, a programação gera um arquivo de saída contendo os dados da malha gerada

1) **TÍTULO**

TÍTULO, IDENTIFICAÇÃO E COMENTÁRIOS, A CRITÉRIO DO USUÁRIO, INCLUÍDOS -NA SAÍDA IMPRESSA E NAS PLOTAGENS.

2)

| 1 | 5 6 | 10 11 | 15 16 | 20 21 | 30 |
|---------------------------|------------------------|--------------------|-------|---------------------------------|----|
| IARQS | IARQP | IPOT (A B C D) | | SCAL | |
| ARQUIVO DE SAÍDA DA MALHA | ARQUIVO PARA O PLOTTER | OPÇÕES DE PLOTAGEM | | FATOR DE ESCALA PARA A PLOTAGEM | |

| DIG. POS. | 0 | 1 | 2 | 3 | OPÇÃO |
|-----------|------------------------|--------------|-----------|--------------------|-------------------|
| A | NAO | SIM | - | - | PLOTAGEM REDUZIDA |
| B | MENOR | MAIOR | - | - | TAMANHO DO PAPEL |
| C | OTIM. P/ TUBO | OTIM. GLOBAL | FORNECIDA | - | ESCALA DO DES. |
| D | PLOT. NORM. NÃO SOLIC. | ELEMENTOS | PONTOS | ELEMENTOS E PONTOS | IDENTIF. NUMÉRICA |

3)

| 1 | 10 11 | 20 |
|----------------------------|-------------------------------|----|
| DIAP | COMP | |
| DIÂMETRO DO TUBO PRINCIPAL | COMPRIMENTO DO TUBO PRINCIPAL | |

FIG. IV.1- DADOS DE ENTRADA

4)

| | | | | | | |
|-----------------------|---|---|--------------------------------------|----|----|--|
| 1 | 5 | 6 | 10 | 11 | 20 | |
| NINT | | | DISP | | | |
| NÚMERO DE INTERSEÇÕES | | | DISTÂNCIA ENTRE PONTOS DE INTERSEÇÃO | | | |

5)

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|----|----|-----------------------------------|----|-----------------------------------|--------------------------------|----|----|
| 1 | 5 | 6 | 10 | 11 | 20 | 21 | 30 | 31 |
| N | | | DIAS | | | COMS | | |
| IDENT. NUM. DO TUBO SECUNDÁRIO | | | DIÂMETRO DO TUBO SECUNDÁRIO | | | COMPRIMENTO DO TUBO SECUNDÁRIO | | |
| 30 | 31 | 40 | 41 | 50 | 51 | 60 | | |
| ANG | | | CX | | CANG | | | |
| ÂNGULO DO TUBO SECUNDÁRIO | | | COORDENADA "X" DO TUBO SECUNDÁRIO | | COORD. ANGULAR DO TUBO SECUNDÁRIO | | | |

6)

| | | | | |
|------------------|---|---|--------------------|--|
| 1 | 5 | 6 | 10 | |
| NNIV | | | NREG | |
| NÚMERO DE NÍVEIS | | | NÚMERO DE REGULAR. | |

7)

| | | | | | | | | |
|----------------------|---|---|------------------------------|----|----|---------------------------------|----|--|
| 1 | 5 | 6 | 10 | 11 | 20 | 21 | 30 | |
| N | | | D 1 | | | D 2 | | |
| IDENT. NUM. DO NÍVEL | | | DISTÂNCIA MÍNIMA P/ UM PONTO | | | DISTÂNCIA MÍNIMA P/ DOIS PONTOS | | |

FIG. IV. 1 - (CONTINUAÇÃO)

da, descrito na seção relativa à saída dos resultados.

A especificação de zero (ou branco) corresponde à opção de não-criação do arquivo.

b) "IARQP" - coluna 6 a 10, inteiro

Contém a identificação numérica "FORTRAN" para o arquivo de fita do *plotter*.

O arquivo é comentado na seção relativa à saída dos resultados. A especificação de zero (ou branco) corresponde à opção de não-solicitação de plotagens.

c) "IPOT" - coluna 11 a 15, inteiro

Especifica as opções de plotagem

Corresponde a um número de até quatro dígitos, "ABCD", com o seguinte significado:

A - plotagem reduzida

0: não solicitada.

1: plotagem reduzida solicitada.

B - tamanho do papel

0: papel menor (largura 15,4").

1: papel maior (largura 36,7").

C - escala dos desenhos

0: escala otimizada por tubo.

1: escala otimizada para toda a junta.

2: escala fornecida pelo usuário.

D - identificação numérica para elementos e/ou pontos

0: plotagem normal não solicitada.

1: identificação dos elementos.

2: identificação dos pontos.

3: identificação dos elementos e pontos (plotagens distintas).

As malhas geradas são plotadas separadamente por cada tubo da junta. As opções especificadas são válidas para toda a junta, ou seja, para todos os tubos.

Têm-se basicamente dois tipos de plotagem. A plotagem reduzida, realizada no formato "A-4", e a plotagem normal.

A plotagem reduzida, solicitada pelo dígito 1 na posição "A", independe das demais opções, podendo ser especificada com ou sem a plotagem normal. A escala é sempre otimizada por tubo, e não é feita a identificação numérica de elementos e pontos. Este tipo de plotagem é válido para uma geração preliminar e para uma avaliação qualitativa da malha obtida. O formato é adequado para compor relatórios, sendo de manuseio mais fácil que a plotagem normal.

Quanto ao tamanho do papel, considerando-se a plotagem

normal, duas opções são possíveis com o *plotter* CALCOMP, especificadas pelo dígito correspondente à posição "B". O papel menor só deve ser utilizado para malhas pouco refinadas. Em malhas muito densas ocorre superposição da identificação numérica dos pontos e/ou elementos, dificultando ou mesmo impedindo a interpretação. É possível modificar a escala do desenho atuando diretamente no *plotter* na ocasião da plotagem, mas esta mudança de escala afeta todo o desenho, incluindo os símbolos, letras e números, não impedindo assim a ocorrência do problema de superposição.

Em relação à escala adotada para os desenhos, dígito relativo à posição "C", ela pode ser fornecida pelo usuário ou então ser estabelecida automaticamente pelo programa. No caso do estabelecimento automático é feita uma otimização, de modo a se utilizar toda a largura útil fixada para o tamanho do papel a ser empregado. A otimização pode ainda ser feita individualmente por tubo, de modo que para cada tubo será utilizada determinada escala, ou abranger toda a junta, quando então a escala é única, determinada pelo tubo de maior diâmetro, ou seja, pelo tubo principal. A menos que necessário ou por outro interesse do usuário, a opção de otimização automática por tubo deve ser preferida, correspondendo ao dígito zero na posição "C".

O dígito correspondente à posição "D" estabelece a opção relativa à identificação numérica de elementos e/ou pontos. A colocação da numeração dos elementos e dos pontos em um mesmo desenho dificulta bastante a visualização, podendo ocorrer

superposição dos números, não sendo portanto incluída. Pode ser especificada a plotagem com numeração de elementos e pontos, mas os desenhos serão distintos, correspondendo assim a dois desenhos para cada tubo. No caso de geração definitiva da malha, a identificação numérica é necessária, devendo ser especificado o dígito três para a posição "D".

O dígito da posição "D" estabelece também a opção de não ser requisitada a plotagem normal, correspondendo à colocação de zero nesta posição. Assim, se os dígitos das posições "A" e "D" forem ambos zero (ou em branco), nenhuma plotagem será produzida.

d) "SCAL" - coluna 21 a 30, real

O campo contém o fator de escala a ser utilizado nas plotagens. As dimensões serão multiplicadas por este fator quando das plotagens. Naturalmente só tem significado com o dígito da posição "C" da opção de plotagem igual a dois, indicando escala fornecida pelo usuário. Com qualquer outro valor, "SCAL" não é considerado.

O fator de escala é válido para toda a junta, sendo responsabilidade do usuário o seu estabelecimento adequado, tendo em vista as unidades utilizadas, dimensões e largura útil do papel que será empregado. Ainda assim caso o fator de escala especificado para o problema seja inadequado para a largura do papel, o programa adota como fator de escala o correspondente à escala otimizada global para a junta. Na listagem

impressa dos dados de entrada é incluído um aviso indicando a não-consideração da escala erroneamente especificada.

3) Um cartão único com a geometria do tubo principal

Contém dois dados, "DIAP" e "COMP", ambos reais, no formato (2F10.3).

a) "DIAP" - coluna 1 a 10, real

Diâmetro médio do tubo principal.

b) "COMP" - coluna 11 a 20, real

Comprimento do tubo principal a ser considerado para a geração, compreendido entre as duas seções transversais extremas.

4) Um cartão único com dados das interseções

Contém dois dados, "NINT" e "DISP", o primeiro inteiro e o segundo real, no formato (I5, 5X, F10.3).

a) "NINT" - coluna 1 a 5, inteiro

Indica o número total de interseções da junta tubular que será analisada, ou seja, o número de tubos secundários que compõem a junta.

b) "DISP" - coluna 11 a 20, real

Contém a distância média a ser considerada entre pontos sucessivos que definem uma linha de junção (linha de interseção).

O valor é válido para todas as junções e corresponde ao lado do menor elemento que comporá a malha a ser gerada, influenciando assim diretamente no grau de refinamento que será obtido.

5) Um conjunto de cartões com a geometria dos tubos secundários

Cada cartão corresponde a um tubo secundário, com seis dados, "N", "DIAS", "COMS", "ANG", "CX" e "CANG", sendo o primeiro inteiro e os demais reais, no formato (I5, 5X, 5F 10.3).

a) "N" - coluna 1 a 5, inteiro

Indica o número de ordem do tubo secundário correspondente ao próprio cartão.

Todos os tubos secundários devem ser numerados sequencialmente a partir do número um. Não há outras restrições quanto a como numerar os tubos e quanto à ordem dos cartões no conjunto.

b) "DIAS" - coluna 11 a 20, real

Contém o diâmetro médio do tubo secundário em questão.

c) "COMS" - coluna 21 a 30, real

Contém o comprimento do tubo secundário da interseção.

Ao contrário do tubo principal, que é limitado para o problema por duas seções transversais extremas, um tubo secundário tem como limites uma seção transversal extrema e uma linha de junção para acoplamento na superfície do tubo principal, obrigando a uma consideração diferente para o comprimento do tubo.

O comprimento de um tubo secundário tem como valor a distância da sua seção transversal extrema, oposta à junção, ao ponto de interseção de sua linha de centro com a linh de centro do tubo principal.

d) "ANG" - coluna 31 a 40, real

Indica o ângulo da junção do tubo secundário com o tubo principal, ou seja, é o ângulo formado pela interseção das linhas de centro do tubo principal e do tubo secundário.

O valor deve ser fornecido em graus na forma de de

cimal e corresponde ao menor ângulo, sem sinal, independente do sentido de giro, medido entre as direções positivas dos eixos "X" do sistema global e "XT" do sistema local do tubo secundário, eixos estes coincidentes com as linhas de centro dos tubos principal e secundário, respectivamente. É importante realçar que devem ser considerados os sentidos positivos dos eixos.

e) "CX" - coluna 41 a 50, real

Corresponde à coordenada que fixa a posição do tubo secundário ao longo do comprimento do tubo principal.

É a coordenada "X" do sistema global do ponto de interseção da linha de centro do tubo secundário com a linha de centro do tubo principal.

f) "CANG" - coluna 51 a 60, real

Corresponde à coordenada angular que fixa a posição do tubo secundário ao longo da circunferência de uma seção transversal do tubo principal.

Considerando-se o plano transversal ao tubo principal, definido pelos eixos "Y" e "Z" do sistema global, e a projeção sobre este plano do eixo do tubo secundário em questão, a coordenada angular é o valor do ângulo entre a direção positiva do eixo "Z" global e a direção positiva da projeção do eixo do tubo secundário. É necessário, portanto, conside

rar as direções positivas dos eixos. O sentido de giro do ângulo pode ser positivo ou negativo. Tem origem sobre o semi-eixo global "Z" positivo, sendo considerado positivo o sentido correspondente ao menor ângulo (90^0), com o semi-eixo global "Y" positivo, contrário portanto à regra da mão direita.

O valor do ângulo deve ser fornecido em graus, na forma decimal.

6) Um cartão com especificações relativas à malha

Contêm dois dados, "NNIV" e "NREG", ambos inteiros, no formato (2I5).

a) "NNIV" - coluna 1 a 5, inteiro

Especifica o número de níveis de gradação a ser utilizado na geração da malha.

Corresponde ao número de níveis de subdivisão dos quadrados do reticulado considerado na geração dos pontos.

Como orientação, a especificação de três ou quatro níveis é normalmente suficiente e adequada.

As seções transversais extremas, limites dos tubos, são representadas por pontos gerados nos centros de quadrados de nível um. Deve-se verificar se o número de níveis não é excessivo, levando a uma dimensão do lado do quadrado

de nível um tal que um número insuficiente de pontos seja gerado nas seções-limite de modo que o modelo de casca poliédrica, já que os elementos finitos são planos, não mais represente aceitavelmente a superfície cilíndrica. O número de níveis determina o maior quadrado, uma vez que o lado do quadrado de maior nível é fixado pela especificação da distância entre pontos de interseção sucessivos, fixando também, indiretamente, as dimensões dos quadrados dos demais níveis que venham a ser utilizados. Um quadrado de nível imediatamente anterior tem o dobro do lado do nível em questão. Como orientação, o lado do maior quadrado não deve exceder a $R/2$, sendo "R" o raio do tubo em consideração.

b) "NREG" - coluna 6 a 10, inteiro

Especifica o número de regularizações posteriores da malha. Normalmente, duas ou três são suficientes.

A regularização é um processo para melhoria da malha gerada. Cada ponto tem sua posição ligeiramente modificada em função das posições dos pontos vizinhos.

7) Um conjunto de cartões compondo a tabela de gradação

O número de cartões é igual ao número especificado de níveis de quadrados.

Cada cartão corresponde a um nível de quadrado e con

têm três dados, "N", "D1" e "D2", sendo o primeiro inteiro e os demais reais, no formato (I5, 5X, 2F10.4).

a) "N" - coluna 1 a 5, inteiro

Indica o número do nível do quadrado correspondente ao cartão.

b) "D1" - coluna 11 a 20, real

Contém o limite mínimo de distância ao ponto de interseção mais próximo acima do qual é gerado um ponto no centro do quadrado do nível correspondente.

c) "D2" - coluna 21 a 30, real

Contém o limite mínimo de distância ao ponto de interseção mais próximo acima do qual são gerados dois pontos no quadrado do nível correspondente.

A tabela de gradação, correspondente ao conjunto de cartões, especifica a gradação da malha, ou seja, a variação na densidade dos pontos. Para um determinado nível de quadrado, é verificada inicialmente a possibilidade de geração de um ponto. Caso a distância do centro do quadrado ao ponto de interseção mais próximo seja inferior ao valor da distância para um ponto, analisa-se a possibilidade de geração de dois pontos. Se também não for possível, o quadrado é subdividido. Os subquadrados resultantes são de um nível imediatamente su

perior. Assim, os valores de distância devem ser decrescentes de um para dois pontos no mesmo nível e decrescentes com o aumento do nível.

O valor da distância para um ponto no primeiro nível deve necessariamente ser inferior à menor distância das seções-limite dos tubos da junta aos pontos de qualquer linha de junção. Garante-se assim a correta representação das seções transversais extremas. Todos os pontos estarão no centro de quadrados de nível um, devidamente alinhados e igualmente espaçados.

O quadrado de último nível, ou seja, de nível mais elevado, contém inclusive os pontos de interseção, não havendo, portanto, limite inferior de distância. O cartão do último nível deve obrigatoriamente ter valores nulos para "D1" e "D2".

Para evitar variação brusca de densidade e a conseqüente formação de elementos muito alongados, recomenda-se que o valor da tabela de distâncias para a geração de dois pontos em determinado nível difira do valor para um ponto do nível imediatamente superior no mínimo de 0,790 L, com exceção do valor para dois pontos no penúltimo nível, onde é recomendado o mínimo de 1,118 L. Nas expressões "L" é o lado do quadrado relativo ao nível em questão que está sendo preenchido. O valor correspondente à geração de um ponto deve diferir do valor para dois pontos no mesmo nível no mínimo de "L". É interessante preencher a tabela de distâncias partindo do maior

nível. O valor do lado dos quadrados é obtido considerando-se que o quadrado de maior nível tem como lado básico o valor especificado para a distância entre pontos de interseção e que um nível imediatamente anterior tem o dobro do lado.

Apesar dos dados de entrada para o programa serem bastante reduzidos, erros podem ocorrer. A programação verifica a ocorrência de certas situações que invalidariam ou mesmo impediriam o processamento normal. E impresso um aviso de erro na listagem de saída da impressora, o programa interrompe o processamento e termina. As situações de erro verificadas correspondem à geração de quadrados de nível diferente de um nas seções extremas dos tubos, a último nível na tabela de distâncias com valores não-nulos e número de pontos, de elementos, de quadrados e de subquadrados ou de outras variáveis internas superiores aos limites fixados na capacidade de processamento. Outras situações não previstas podem ocorrer, e a impressão dos dados de entrada deve ser sempre verificada.

IV.3 - DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados compreendem a saída impressa da malha gerada, as plotagens solicitadas e o arquivo com os pontos gerados e com a conectividade dos elementos para o cálculo posterior das tensões atuantes.

Inicialmente a impressão apresenta o cabeçalho com o título especificado para o problema e uma edição dos dados de entrada onde é incluído para a indicação da distância entre

pontos de interseção, além do valor especificado, o valor médio adotado. Estes valores são ligeiramente diferentes devido à necessidade de ajuste das dimensões dos quadrados às dimensões do tubo principal, o que é feito automaticamente com base no valor especificado.

A seguir a impressão indica para cada junção de tubo secundário a lista dos pontos que definem a respectiva linha de interseção do tubo secundário com o tubo principal. Inclui o total de pontos da interseção, a identificação numérica de cada ponto e suas coordenadas no sistema global.

A saída impressa apresenta em seguida a geração da malha de cada tubo da junta, iniciando com o tubo principal. Para cada tubo são indicadas informações relativas ao processo de geração, relação dos pontos gerados com a identificação numérica e com as coordenadas no sistema global e relação dos elementos da malha com a identificação numérica e a conectividade. As informações sobre o processo de geração compreendem a dimensão dos lados dos quadrados de cada nível e os parâmetros relativos à qualidade da malha obtida sem regularização e após cada uma das regularizações especificadas. A avaliação qualitativa é feita considerando-se o desvio da situação ideal de triângulo equilátero. É informado o desvio médio da malha, o desvio máximo e o correspondente pior elemento produzido. Na relação dos pontos gerados em um tubo secundário são incluídos também os pontos situados na linha de junção pertencentes, portanto, também ao tubo principal e assim já listados. São os primeiros pontos da relação e são separados dos

demaís através de uma linha tracejada. No início das relações de pontos e de elementos são informados os números de pontos e de elementos gerados no tubo sob consideração.

Concluindo a saída impressa, é fornecida uma totalização geral do problema quanto aos pontos e elementos gerados, para toda a junta e para cada tubo.

A programação inclui opções para plotagem das malhas geradas, considerando-se o emprego de *plotter* marca "CALCOMP", de rolo, disponível no Centro de Pesquisas da PETROBRÁS. O equipamento é *off-line*, e a programação gera um arquivo em fita magnética, contendo os códigos para o *plotter* para posterior alimentação. O usuário deve prover por "JCL", caso seja solicitada alguma plotagem, o cartão de especificação para o arquivo de fita, conforme a identificação numérica adotada internamente pela programação (identificação "FORTRAN" para o arquivo), fixada pelo usuário através da variável "IARQP" no segundo cartão de dados de entrada.

A plotagem da malha é feita por cada tubo da junta, considerando-se sua superfície desenvolvida. A programação possibilita uma série de opções, comentadas na seção referente aos dados de entrada.

Cada plotagem inclui uma identificação do tubo a que se refere e, exceto na plotagem reduzida correspondente ao formato "A-4", inclui também o título identificador do problema, especificado pelo usuário.

A plotagem é realizada considerando a superfície desenvolvida de cada tubo vista externamente. Para sua perfeita interpretação é necessário considerar a posição da geratriz de abertura da superfície. No caso do tubo principal, a geratriz é fixada pelo ponto da seção transversal de coordenada global $Z = -R$, sendo "R" o raio do tubo. Para cada tubo secundário a consideração é análoga, correspondendo à coordenada do sistema local do tubo $ZT = -r$, sendo "r" o raio do tubo secundário.

A geratriz de abertura aparece nas plotagens como duas linhas laterais longitudinais. Para facilidade de visualização, os elementos com pontos nos dois lados da geratriz, ou seja, elementos interceptados pela geratriz, são duplamente representados, sendo desenhados junto a cada uma das duas linhas laterais. Evita-se assim que tais elementos apareçam incompletos na plotagem, dificultando a interpretação da malha.

Objetivando também a visualização e a interpretação, nas plotagens da malha de um tubo principal os pontos que compõem as linhas de junção com os tubos secundários são representados por meio de asteriscos, destacando-os dos demais.

A saída impressa e as plotagens permitem a visualização, interpretação, avaliação e documentação da malha gerada. A programação produz ainda um arquivo de saída sequencial em formato cartão, em meio físico mais adequado para a utilização posterior em programas de cálculo estrutural, contendo os dados da malha gerada. Pode ser criado em cartão, fita magnética

tica, disquete ou em meios análogos, conforme a determinação do usuário através de "JCL" para o cartão de especificação de arquivo de dados para o sistema operacional do computador utilizado. Para tanto, a identificação numérica adotada internamente pela programação, identificação "FORTRAN" para o arquivo, corresponde ao valor especificado pelo usuário para a variável "IARQS" no segundo cartão de dados de entrada.

O arquivo é único para toda a junta, e os dados são ordenados por tubo. Para cada tubo têm-se os pontos da malha e a conectividade dos elementos de modo semelhante à saída impressa. Cada ponto ou cada elemento corresponde a um registro. Não há separadores ou identificadores entre os dados de um tubo para outro e entre dados de pontos e de conectividade. Os pontos das linhas de junção comuns ao tubo principal e ao respectivo tubo secundário são incluídos apenas nos dados referentes ao tubo principal.

Naturalmente é necessária uma edição e preparação do arquivo de modo a adequá-lo às especificações de entrada do sistema ou do programa de análise estrutural que realizará o cálculo das tensões. Devem-se submeter os pontos da malha a um procedimento automático de reordenação, procurando obter uma menor largura de banda para o sistema de equações e considerando para isto se será utilizado ou não o procedimento de subestruturas na análise estrutural.

IV.4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÕES PRÁTICAS DO PROGRAMA

Como ilustração da aplicação da programação de geração automática, são apresentados e comentados três exemplos que caracterizam a utilização do programa "GEMAT".

O primeiro exemplo inclui toda a saída impressa dos resultados da malha e as plotagens normal e reduzida (formato A-4), ilustrando uma aplicação completa. A junta é simples, e a malha é pouco refinada, facilitando a ilustração.

O segundo exemplo compreende a geração da malha em uma junta genérica, não correspondendo a nenhuma configuração típica. É constituída por dois tubos secundários de diferentes diâmetros e com eixos não contidos no mesmo plano. A configuração é, portanto, espacial, sendo esta a principal característica do exemplo, ilustrando a capacidade da programação em uma geometria qualquer. São apresentadas as plotagens reduzidas dos tubos principal e secundários.

O terceiro exemplo demonstra a potencialidade e a flexibilidade da programação, correspondendo à geração da malha em uma junta bastante complexa, constituída por cinco tubos secundários. É apresentada a plotagem reduzida da malha do tubo principal, de maior interesse.

O primeiro exemplo compreende a geração da malha de elementos finitos na junta tubular representada na figura IV.2, correspondendo a uma configuração plana do tipo "Y".

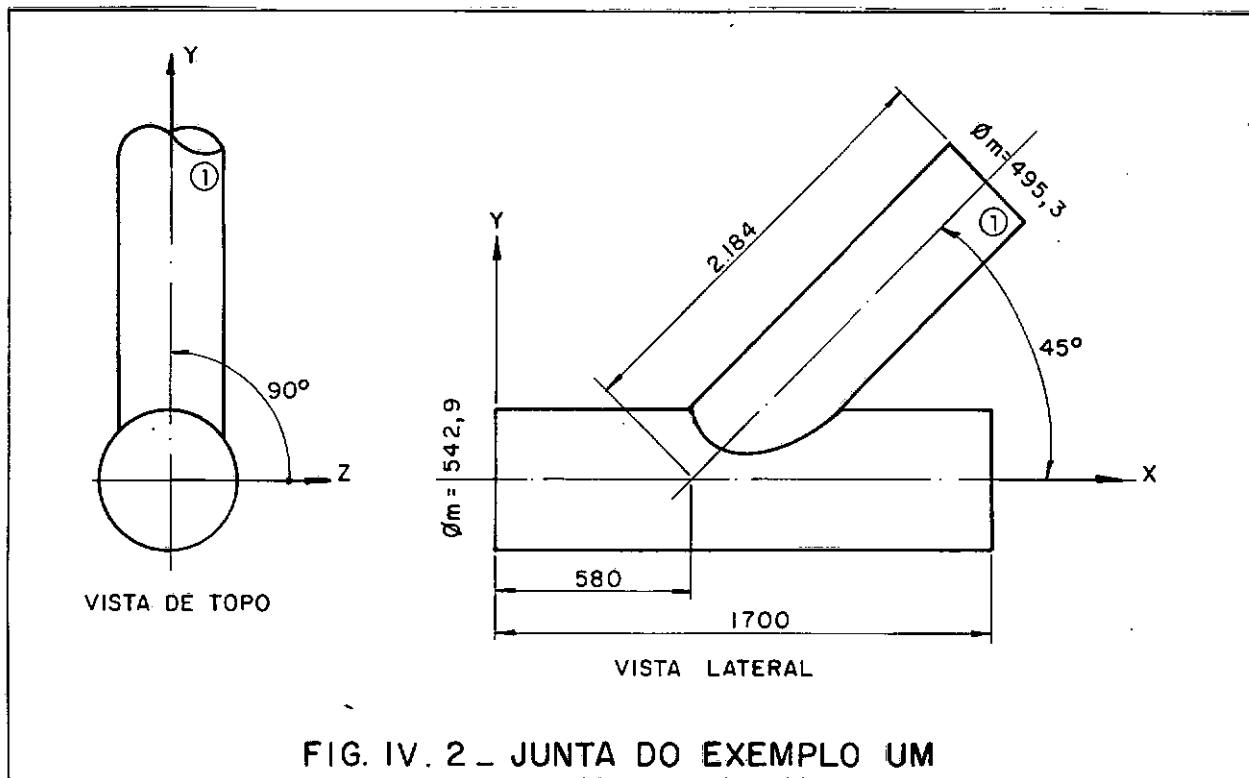


FIG. IV. 2 - JUNTA DO EXEMPLO UM

O espaçamento básico especificado para os pontos de interseção foi de 100 mm. Após a determinação dos lados dos quadrados do reticulado da superfície do tubo principal e os necessários ajustes às dimensões do tubo, o valor médio do espaçamento resultou em 94,6 mm, sendo este o valor adotado internamente. O número de regularizações posteriores da malha foi especificado em três, indicando que a rotina de regularização será repetida três vezes. O número de níveis de quadrados foi especificado em dois. Os dados de entrada constam da reprodução da listagem impressa.

Foram gerados 22 pontos de interseção, correspondendo à interseção de número um, relativa ao único tubo secundário da junta.

Para cada tubo são incluídos os valores relativos às dimensões dos retângulos/quadrados de cada nível adotados para o reticulado da respectiva superfície.

Também para cada tubo são indicados os valores do desvio médio, desvio máximo e a identificação do correspondente pior elemento, de acordo com o parâmetro de afastamento da situação de um triângulo equilátero. Os valores referem-se à malha sem regularização e após cada uma das regularizações realizadas. Os resultados obtidos para o exemplo demonstram que a primeira regularização é a mais eficiente. A melhora é sensível para a malha como um todo, conforme indica o desvio médio, com menor proveito para o desvio máximo.

As coordenadas dos pontos gerados e a conectividade dos elementos são listadas por tubo. Os pontos das linhas de junção constam tanto do tubo principal como do respectivo tubo secundário. Tais pontos são separados dos demais através de uma linha tracejada na listagem do tubo secundário onde estão agrupados no início, pois correspondem a uma extremidade.

Ao final da impressão é incluído um resumo global. Foi gerado o total de 320 pontos, sendo 197 no tubo principal e 145 no tubo secundário, devendo-se descontar os 22 pontos de interseção incluídos simultaneamente nos dois tubos. Foram gerados 636 elementos, sendo 376 no tubo principal e 260 no tubo secundário.

Apenas como indicação relativa, o tempo de "CPU" con

sumido para o exemplo foi de cerca de 35 segundos em computador IBM/370-158.

O segundo exemplo corresponde à junta representada na figura IV.3. Não é apresentada a saída impressa completa, uma vez que não há maior interesse nos valores das coordenadas, cujo formato da saída já foi ilustrado no exemplo anterior. Por motivos análogos, são apresentadas apenas as plotagens reduzidas. O tempo de "CPU" foi de 2 minutos e 20 segundos.

O terceiro exemplo corresponde à junta representada na figura IV.4. É uma junta da plataforma "PCR-1" da PETROBRÁS, do campo de Curimã, no litoral do Estado do Ceará. São apresentadas uma saída impressa parcial e a plotagem reduzida do tubo principal. O tempo de "CPU" para a geração da malha, com o total de 2808 pontos e 5744 elementos, foi de 31 minutos e 20 segundos.

Têm-se a seguir as saídas impressas e as plotagens relativas aos exemplos.

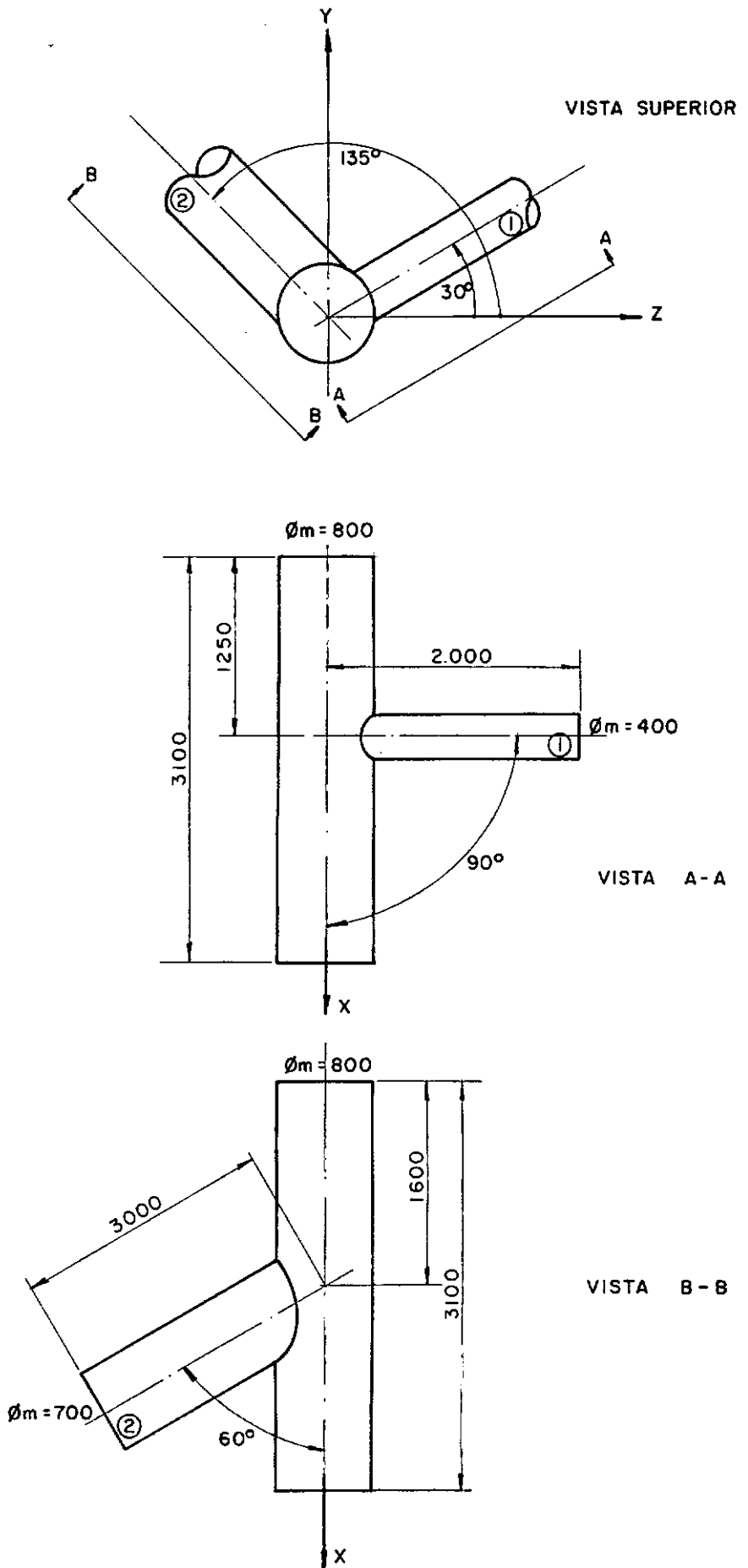


FIG. IV. 3 - JUNTA DO EXEMPLO DOIS

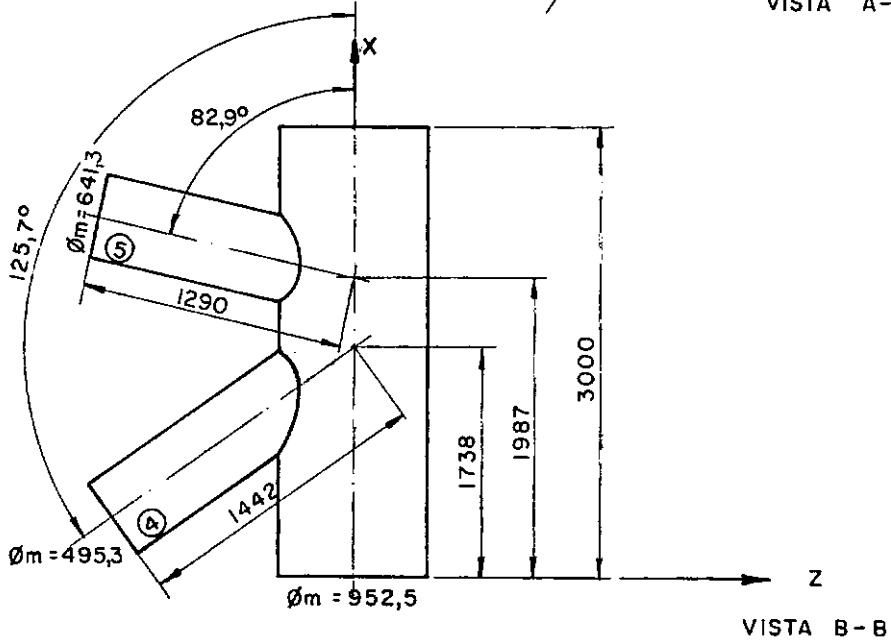
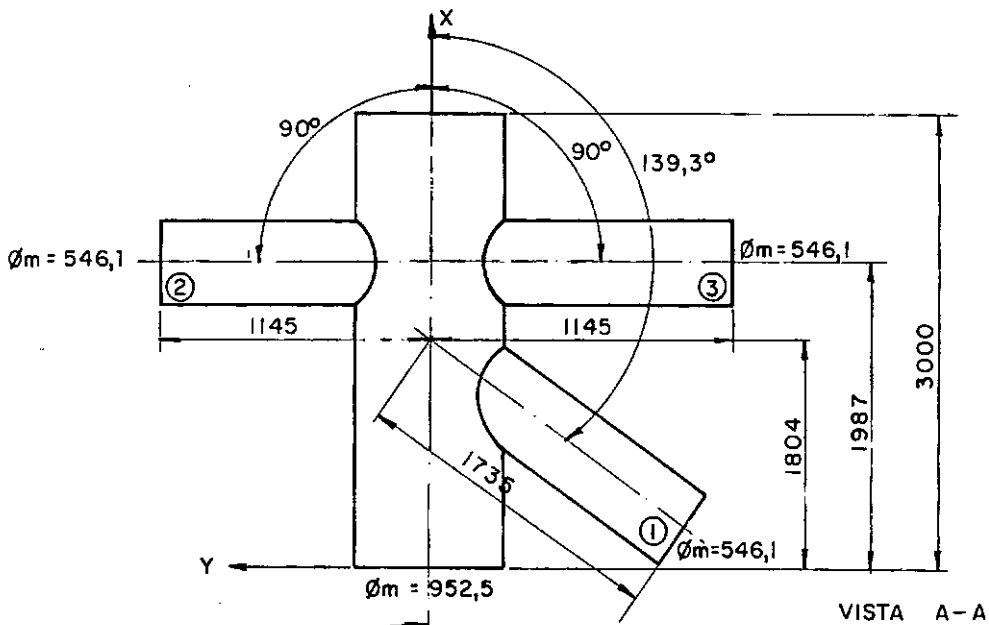
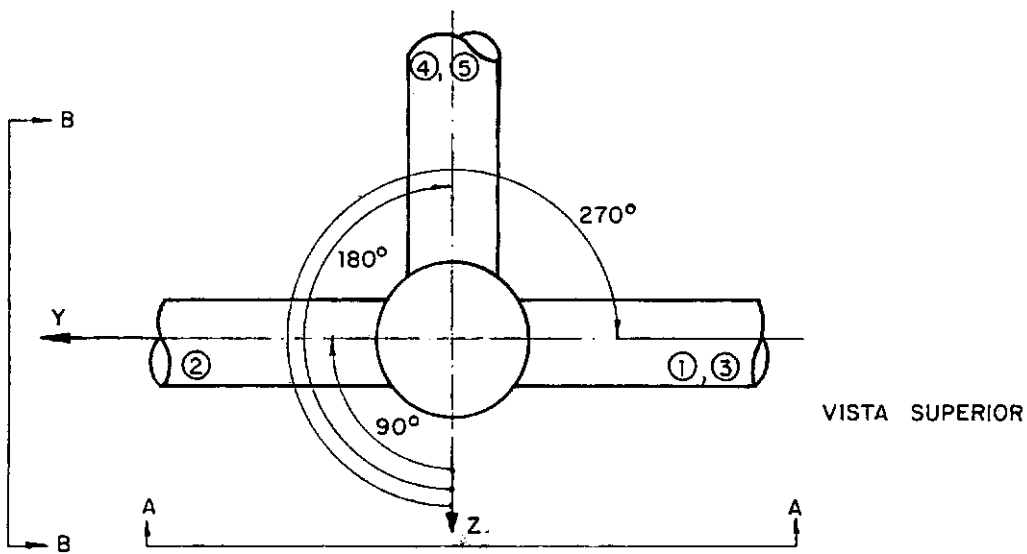


FIG. IV. 4 - JUNTA DO EXEMPLO TRÊS

SAÍDA IMPRESSA E PLOTAGENS DOS EXEMPLOS

```

*****
*                                     *
*               * GEMAT *           *
*                                     *
*           GERACAO AUTOMATICA       *
* * DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS *
*           EM JUNTAS TUBULARES     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*                                     *
* EXEMPLO UM - JUNTA Y - DISPI=100 MM 2 NIVEIS 3 REGUL. *
*                                     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   DADOS DE ENTRADA               *
*                                     *
*****

```

*** TUBO PRINCIPAL

DIAMETRO...= 542.9248
 COMPRIMENTO= 1700.0000

*** INTERSECAO NUMERO 1

DIAMETRO...= 495.2998
 COMPRIMENTO= 2184.0000
 ANGULO.....= 45.0000
 COORD. X...= 580.0000
 COORD. ANG.= 90.0000

*** DISTANCIA ENTRE PONTOS DE INTERSECAO

VALOR FORNECIDO....= 100.0000
 VALOR MEDIO ADOTADO= 94.6013

*** DISTANCIAS PARA OS NIVEIS
 LIMITES INFERIORES

| NUM. DO NIVEL | P/ UM PONTO | P/ DOIS PONTOS |
|---------------|-------------|----------------|
| 1 | 450.0000 | 230.0000 |
| 2 | 0.0 | 0.0 |

*** REGULARIZACAO DA MALHA
 NUM. DE REGULARIZACOES=3

*** PLOTAGEM DA MALHA - OPCAO=1023
 IDENTIFICACAO DO ARQUIVO = 15

PLOTAGEM REDUZIDA SOLICITADA

PLOTAGEM NORMAL SOLICITADA
 OPCOES - PAPEL DE MENOR LARGURA
 ESCALA FORNECIDA= 0.0085
 NUMERACAO DOS ELEMENTOS E DOS PONTOS

*** ARQUIVO DE SAIDA DA MALHA= 0
 SAIDA NAO SOLICITADA

```

*****
*
* INTERSECAO NUM. 1 *
*
*****

```

```

*** COORDENADAS DOS PONTOS
    NUM. DE PONTOS= 22

```

| NUM. DO PT. | COORD. X | COORD. Y | COORD. Z |
|-------------|-----------|----------|-----------|
| 56 | 501.2324 | 271.4624 | 0.0009 |
| 58 | 510.1282 | 255.5777 | 91.4981 |
| 60 | 536.9763 | 211.6196 | 170.0264 |
| 63 | 584.3865 | 152.9699 | 224.2589 |
| 88 | 665.3301 | 112.8743 | 246.8830 |
| 89 | 760.1079 | 119.2251 | 243.8795 |
| 90 | 848.8179 | 142.5804 | 231.0036 |
| 118 | 935.6768 | 171.3283 | 210.5669 |
| 117 | 1019.3870 | 201.5844 | 181.8119 |
| 143 | 1098.0264 | 231.2565 | 142.1698 |
| 142 | 1166.7793 | 257.8167 | 84.9847 |
| 140 | 1201.6917 | 271.4624 | -0.0002 |
| 138 | 1166.7793 | 257.8169 | -84.9835 |
| 135 | 1098.0264 | 231.2572 | -142.1687 |
| 109 | 1019.3870 | 201.5851 | -181.8112 |
| 106 | 935.6768 | 171.3292 | -210.5662 |
| 79 | 848.8179 | 142.5812 | -231.0031 |
| 78 | 760.1079 | 119.2260 | -243.8790 |
| 77 | 665.3301 | 112.8752 | -246.8826 |
| 51 | 584.3865 | 152.9707 | -224.2583 |
| 52 | 536.9763 | 211.6202 | -170.0257 |
| 54 | 510.1282 | 255.5780 | -91.4972 |

```

*****
*                                     *
*           TUBO PRINCIPAL          *
*                                     *
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 188.8889 | 189.5165 |
| 2 | 94.4444 | 94.7583 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.31281 | 0.55739 | 47 |
| 1 | 0.22150 | 0.55733 | 326 |
| 2 | 0.21199 | 0.50061 | 326 |
| 3 | 0.20986 | 0.47423 | 326 |

 *
 * PONTOS GERADOS *
 *

*** COORDENADAS DOS PONTOS
 NUM. DE PONTOS= 197

| PONTO | COORD. X | COORD. Y | COORD. Z | PONTO | COORD. X | COORD. Y | COORD. Z |
|-------|----------|-----------|-----------|-------|----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.0 | 92.8457 | -255.0912 | 2 | 0.0 | 235.0935 | -135.7309 |
| 3 | 0.0 | 267.3381 | 47.1390 | 4 | 0.0 | 174.4926 | 207.9523 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 271.4624 | 6 | 0.0 | -174.4926 | 207.9523 |
| 7 | 0.0 | -267.3381 | 47.1390 | 8 | 0.0 | -235.0935 | -135.7309 |
| 9 | 0.0 | -92.8457 | -255.0912 | 10 | 154.1270 | 184.0740 | -199.5209 |
| 11 | 222.2237 | 63.9413 | -263.8245 | 12 | 165.1446 | 263.4565 | -65.4401 |
| 13 | 250.8981 | 220.4886 | -158.3559 | 14 | 171.4195 | 245.8660 | 115.0727 |
| 15 | 266.8899 | 271.2524 | 10.6725 | 16 | 170.8186 | 117.3560 | 244.7844 |
| 17 | 269.2695 | 198.1222 | 185.5787 | 18 | 166.8604 | -47.5417 | 267.2668 |
| 19 | 280.2605 | 39.9013 | 268.5139 | 20 | 216.1503 | -143.7219 | 216.5340 |
| 21 | 219.1479 | -255.5897 | 91.4644 | 22 | 161.3951 | -260.8540 | -75.1461 |
| 23 | 196.9625 | -129.0656 | -238.8177 | 24 | 333.5991 | 85.6641 | -257.6116 |
| 25 | 437.9656 | 74.8062 | -260.9517 | 26 | 281.3940 | 156.3512 | -221.9147 |
| 27 | 384.1504 | 153.8524 | -223.6543 | 28 | 332.0432 | 207.1327 | -175.4648 |
| 29 | 426.1150 | 223.4870 | -154.0955 | 30 | 515.1445 | 256.1458 | -89.8948 |
| 31 | 417.4084 | 265.8645 | -54.8434 | 32 | 347.9751 | 271.4502 | -2.5641 |
| 33 | 408.0857 | 270.3772 | 24.2487 | 34 | 336.8694 | 252.6399 | 99.3223 |
| 35 | 438.9832 | 260.2725 | 77.1365 | 36 | 352.2791 | 197.1796 | 186.5799 |
| 37 | 436.9280 | 220.0340 | 158.9870 | 38 | 313.6294 | 133.2333 | 236.5179 |
| 39 | 398.4319 | 158.1947 | 220.6043 | 40 | 344.4360 | -71.4867 | 261.8806 |
| 41 | 406.8105 | 70.0251 | 262.2751 | 42 | 362.6150 | -195.4354 | 188.4061 |
| 43 | 471.5979 | -130.8016 | 237.8713 | 44 | 411.9868 | -256.6064 | 88.5712 |
| 45 | 398.0598 | -258.6990 | -82.2593 | 46 | 359.9880 | -12.2827 | -271.1843 |
| 47 | 440.5881 | -139.2333 | -233.0363 | 48 | 529.9729 | 87.2817 | -257.0481 |
| 49 | 614.9336 | 65.7893 | -263.3696 | 50 | 483.2610 | 155.8388 | -222.2748 |
| 51 | 584.3865 | 152.9707 | -224.2583 | 52 | 536.9763 | 211.6202 | -170.0257 |
| 53 | 634.6750 | 207.9335 | -174.5150 | 54 | 510.1282 | 255.5780 | -91.4972 |
| 55 | 593.5974 | 250.5692 | -104.4361 | 56 | 501.2324 | 271.4624 | 0.0009 |
| 57 | 589.1194 | 271.4390 | 3.5555 | 58 | 510.1282 | 255.5777 | 91.4981 |
| 59 | 597.1279 | 247.9391 | 110.5352 | 60 | 536.9763 | 211.6196 | 170.0264 |
| 61 | 635.5610 | 203.0445 | 180.1798 | 62 | 480.0872 | 154.1129 | 223.4749 |
| 63 | 584.3865 | 152.9699 | 224.2589 | 64 | 517.1711 | 84.4944 | 257.9778 |
| 65 | 603.6606 | 58.3190 | 265.1238 | 66 | 513.5823 | -20.3577 | 270.6978 |
| 67 | 632.4741 | -20.3678 | 270.6970 | 68 | 520.3564 | -209.6881 | 172.4028 |
| 69 | 620.6958 | -116.0448 | 245.4087 | 70 | 568.4197 | -265.3926 | 57.0832 |
| 71 | 560.4714 | -209.1340 | -173.0745 | 72 | 637.2292 | -261.3884 | -73.2657 |
| 73 | 524.6392 | -10.5083 | -271.2588 | 74 | 610.1411 | -120.0647 | -243.4673 |
| 75 | 700.9546 | 68.6008 | -262.6514 | 76 | 784.2141 | 59.8571 | -264.7808 |
| 77 | 665.3301 | 112.8752 | -246.8826 | 78 | 760.1079 | 119.2260 | -243.8790 |
| 79 | 848.8179 | 142.5812 | -231.0031 | 80 | 731.9250 | 201.6813 | -181.7044 |
| 81 | 814.4299 | 192.7379 | -191.1647 | 82 | 697.6533 | 261.6101 | -72.4704 |
| 83 | 822.4250 | 249.3376 | -107.3434 | 84 | 713.4131 | 256.4998 | 88.8302 |
| 85 | 797.2424 | 271.3494 | -7.8299 | 86 | 715.5840 | 138.1997 | 195.6341 |
| 87 | 803.4055 | 206.5921 | 176.1002 | 88 | 665.3301 | 112.8743 | 246.3830 |
| 89 | 760.1079 | 119.2251 | 243.8795 | 90 | 848.8179 | 142.5804 | 231.0036 |
| 91 | 712.3967 | 41.8008 | 268.2246 | 92 | 806.5076 | 76.3074 | 260.5049 |
| 93 | 715.1956 | -44.8130 | 267.7378 | 94 | 810.7642 | 0.0006 | 271.4624 |
| 95 | 690.8860 | -213.6663 | 167.4471 | 96 | 804.5964 | -112.7751 | 246.9283 |
| 97 | 756.0786 | -266.7588 | 50.3149 | 98 | 725.2427 | -198.1345 | -135.5656 |

| | | | | | | | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|
| 99 | 820.9009 | -260.1448 | -77.5661 | 100 | 734.7605 | -103.6898 | -250.8789 |
| 101 | 850.3691 | -131.2863 | -237.6042 | 102 | 683.0742 | -10.8607 | -271.2449 |
| 103 | 816.4641 | -28.8752 | -269.9221 | 104 | 906.3096 | 68.4788 | -262.6831 |
| 105 | 1012.4272 | 39.0191 | -268.6433 | 106 | 935.6768 | 171.3292 | -210.5662 |
| 107 | 1011.7896 | 125.8205 | -240.5432 | 108 | 999.5718 | 216.0971 | -164.2982 |
| 109 | 1019.3870 | 201.5851 | -181.8112 | 110 | 921.6563 | 258.0913 | -84.1466 |
| 111 | 1002.4419 | 247.8342 | -110.7703 | 112 | 880.6272 | 276.2366 | -25.7689 |
| 113 | 991.1367 | 271.4243 | -4.5362 | 114 | 870.2778 | 260.5723 | 76.1177 |
| 115 | 993.8958 | 248.5737 | 109.1007 | 116 | 911.9094 | 212.1260 | 169.3942 |
| 117 | 1019.3870 | 201.5844 | 181.8119 | 118 | 935.6768 | 171.3283 | 210.5669 |
| 119 | 998.4375 | 132.8335 | 236.7427 | 120 | 907.8057 | 79.4664 | 259.5706 |
| 121 | 1035.6772 | 49.0346 | 266.9971 | 122 | 927.8235 | -24.9458 | 270.3137 |
| 123 | 1016.8628 | -34.3476 | 269.2805 | 124 | 877.2883 | -216.0840 | 164.3154 |
| 125 | 994.8872 | -117.8672 | 244.5387 | 126 | 945.5938 | -268.8960 | 37.2381 |
| 127 | 879.1797 | -210.7751 | -171.0722 | 128 | 990.5923 | -251.6869 | -101.7130 |
| 129 | 950.2051 | -44.8111 | -267.7333 | 130 | 1013.4653 | -162.7212 | -217.2865 |
| 131 | 1103.8677 | 82.7851 | -258.5313 | 132 | 1219.1567 | 50.3971 | -266.7432 |
| 133 | 1102.3203 | 170.1713 | -211.5031 | 134 | 1186.0562 | 157.0810 | -234.3088 |
| 135 | 1098.0264 | 231.2572 | -142.1687 | 136 | 1205.3164 | 212.8934 | -168.4227 |
| 137 | 1074.1748 | 262.2129 | -70.2579 | 138 | 1166.7793 | 257.8169 | -84.9835 |
| 139 | 1112.1836 | 271.4600 | -1.1079 | 140 | 1201.6917 | 271.4624 | -0.0002 |
| 141 | 1072.4038 | 262.8555 | 67.8142 | 142 | 1166.7793 | 257.8167 | 84.9847 |
| 143 | 1098.0264 | 231.2565 | 142.1698 | 144 | 1202.2913 | 212.2275 | 169.2670 |
| 145 | 1105.8789 | 156.1389 | 222.0641 | 146 | 1197.2695 | 153.3084 | 224.0276 |
| 147 | 1110.8887 | -35.8117 | 269.0898 | 148 | 1194.5859 | 76.5227 | 260.4536 |
| 149 | 1075.5208 | -222.4442 | 155.5970 | 150 | 1155.3179 | -135.4364 | 235.2632 |
| 151 | 1157.4753 | -271.4089 | -5.3878 | 152 | 1126.5537 | -228.6005 | -146.4023 |
| 153 | 1105.4753 | -37.5354 | -268.8547 | 154 | 1186.9478 | -150.2367 | -226.0990 |
| 155 | 1304.2539 | 147.8113 | -227.6920 | 156 | 1369.2566 | 16.7896 | -270.9426 |
| 157 | 1309.1804 | 223.3681 | -154.2676 | 158 | 1398.8457 | 208.0340 | -174.3952 |
| 159 | 1271.0947 | 260.7551 | -75.5575 | 160 | 1359.0554 | 250.9023 | -103.6334 |
| 161 | 1277.6557 | 271.4612 | 0.7659 | 162 | 1368.6948 | 271.4331 | -5.9776 |
| 163 | 1267.4614 | 260.3132 | 76.9985 | 164 | 1355.6187 | 251.4873 | 102.2055 |
| 165 | 1362.5405 | 223.6918 | 153.7979 | 166 | 1398.8074 | 210.9257 | 170.8865 |
| 167 | 1289.8477 | 162.8192 | 217.2136 | 168 | 1380.5508 | 152.1243 | 224.8333 |
| 169 | 1274.5801 | -50.4303 | 266.7368 | 170 | 1354.8755 | 73.4020 | 259.8740 |
| 171 | 1325.1304 | -218.6585 | 160.8735 | 172 | 1353.9678 | -269.8315 | -29.7112 |
| 173 | 1276.3118 | -228.7091 | -146.2326 | 174 | 1245.5654 | -52.8965 | -266.2588 |
| 175 | 1342.2786 | -127.5562 | -239.6273 | 176 | 1430.2937 | 130.1741 | -238.2153 |
| 177 | 1537.8013 | 48.0722 | -267.1719 | 178 | 1439.7170 | 250.9609 | -103.4913 |
| 179 | 1534.4336 | 194.9113 | -188.7482 | 180 | 1440.0437 | 259.9600 | 78.1831 |
| 181 | 1532.2288 | 269.9763 | -28.3596 | 182 | 1481.0527 | 146.0473 | 228.3272 |
| 183 | 1542.0208 | 239.9801 | 126.8911 | 184 | 1510.8540 | -40.0490 | 268.4917 |
| 185 | 1551.3311 | -219.4128 | 159.3432 | 186 | 1519.3926 | -271.3860 | -6.4323 |
| 187 | 1483.0852 | -211.3722 | -170.3339 | 188 | 1486.4834 | -79.7461 | -259.4849 |
| 189 | 1699.9998 | 92.8457 | -255.0912 | 190 | 1699.9998 | 235.0935 | -135.7309 |
| 191 | 1699.9998 | 267.3381 | 47.1300 | 192 | 1699.9998 | 174.4926 | 207.9523 |
| 193 | 1699.9998 | 0.0 | 271.4624 | 194 | 1699.9998 | -174.4926 | 207.9523 |
| 195 | 1699.9998 | -267.3381 | 47.1300 | 196 | 1699.9998 | -235.0935 | -135.7309 |
| 197 | 1699.9998 | -92.8457 | -255.0912 | | | | |

 *
 * ELEMENTOS GERADOS *
 *

*** CONECTIVIDADE DOS ELEMENTOS
 NUM. DE ELEMENTOS= 376

ELEMENTO VERT. 1 VERT. 2 VERT. 3

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 9 | 1 | 23 |
| 4 | 10 | 1 | 2 |
| 7 | 12 | 3 | 14 |
| 10 | 16 | 4 | 5 |
| 13 | 18 | 6 | 20 |
| 16 | 21 | 7 | 22 |
| 19 | 23 | 8 | 9 |
| 22 | 47 | 23 | 46 |
| 25 | 24 | 11 | 26 |
| 28 | 13 | 10 | 12 |
| 31 | 15 | 12 | 14 |
| 34 | 17 | 14 | 16 |
| 37 | 19 | 16 | 18 |
| 40 | 40 | 20 | 42 |
| 43 | 44 | 21 | 45 |
| 46 | 70 | 45 | 72 |
| 49 | 71 | 47 | 74 |
| 52 | 73 | 46 | 25 |
| 55 | 27 | 24 | 26 |
| 58 | 28 | 13 | 30 |
| 61 | 31 | 30 | 32 |
| 64 | 32 | 34 | 33 |
| 67 | 37 | 34 | 36 |
| 70 | 36 | 38 | 39 |
| 73 | 41 | 19 | 40 |
| 76 | 43 | 40 | 42 |
| 79 | 68 | 44 | 70 |
| 82 | 97 | 70 | 72 |
| 85 | 98 | 72 | 71 |
| 88 | 100 | 74 | 102 |
| 91 | 49 | 73 | 48 |
| 94 | 50 | 25 | 27 |
| 97 | 50 | 29 | 52 |
| 100 | 54 | 31 | 56 |
| 103 | 56 | 33 | 35 |
| 106 | 58 | 37 | 60 |
| 109 | 39 | 37 | 36 |
| 112 | 64 | 41 | 66 |
| 115 | 67 | 66 | 69 |
| 118 | 69 | 68 | 95 |
| 121 | 124 | 95 | 97 |
| 124 | 126 | 99 | 128 |
| 127 | 127 | 98 | 101 |
| 130 | 103 | 100 | 102 |
| 133 | 75 | 102 | 49 |
| 134 | 51 | 49 | 48 |
| 139 | 51 | 52 | 53 |
| 142 | 55 | 54 | 57 |
| 145 | 57 | 58 | 59 |

ELEMENTO VERT. 1 VERT. 2 VERT. 3

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 2 | 23 | 1 | 11 |
| 5 | 10 | 2 | 12 |
| 8 | 14 | 3 | 4 |
| 11 | 16 | 5 | 18 |
| 14 | 20 | 6 | 21 |
| 17 | 22 | 7 | 2 |
| 20 | 22 | 23 | 45 |
| 23 | 46 | 23 | 11 |
| 26 | 26 | 11 | 10 |
| 29 | 13 | 12 | 30 |
| 32 | 15 | 14 | 34 |
| 35 | 17 | 16 | 38 |
| 38 | 19 | 18 | 40 |
| 41 | 42 | 20 | 21 |
| 44 | 45 | 21 | 22 |
| 47 | 72 | 45 | 71 |
| 50 | 74 | 47 | 73 |
| 53 | 25 | 46 | 24 |
| 56 | 27 | 26 | 28 |
| 59 | 28 | 30 | 29 |
| 62 | 32 | 30 | 15 |
| 65 | 33 | 34 | 35 |
| 68 | 36 | 34 | 17 |
| 71 | 39 | 38 | 41 |
| 74 | 41 | 40 | 66 |
| 77 | 43 | 42 | 68 |
| 80 | 63 | 70 | 95 |
| 83 | 97 | 72 | 99 |
| 86 | 98 | 71 | 74 |
| 89 | 102 | 74 | 73 |
| 92 | 48 | 73 | 25 |
| 95 | 50 | 27 | 29 |
| 98 | 52 | 29 | 54 |
| 101 | 56 | 31 | 33 |
| 104 | 56 | 35 | 58 |
| 107 | 60 | 37 | 62 |
| 110 | 62 | 39 | 41 |
| 113 | 64 | 66 | 65 |
| 116 | 69 | 66 | 43 |
| 119 | 69 | 95 | 96 |
| 122 | 124 | 97 | 126 |
| 125 | 128 | 99 | 127 |
| 128 | 101 | 98 | 100 |
| 131 | 103 | 102 | 76 |
| 134 | 75 | 49 | 77 |
| 137 | 51 | 48 | 50 |
| 140 | 53 | 52 | 55 |
| 143 | 57 | 54 | 56 |
| 146 | 59 | 58 | 60 |

ELEMENTO VERT. 1 VERT. 2 VERT. 3

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 3 | 11 | 1 | 10 |
| 6 | 12 | 2 | 3 |
| 9 | 14 | 4 | 16 |
| 12 | 18 | 5 | 6 |
| 15 | 21 | 6 | 7 |
| 18 | 22 | 8 | 23 |
| 21 | 45 | 23 | 47 |
| 24 | 46 | 11 | 24 |
| 27 | 26 | 10 | 13 |
| 30 | 30 | 12 | 15 |
| 33 | 34 | 14 | 17 |
| 36 | 38 | 16 | 19 |
| 39 | 40 | 18 | 20 |
| 42 | 42 | 21 | 44 |
| 45 | 44 | 45 | 70 |
| 48 | 71 | 45 | 47 |
| 51 | 73 | 47 | 46 |
| 54 | 25 | 24 | 27 |
| 57 | 28 | 26 | 13 |
| 60 | 29 | 30 | 31 |
| 63 | 32 | 15 | 34 |
| 66 | 35 | 34 | 37 |
| 69 | 36 | 17 | 38 |
| 72 | 41 | 58 | 19 |
| 75 | 66 | 40 | 43 |
| 78 | 68 | 42 | 44 |
| 81 | 95 | 70 | 97 |
| 84 | 99 | 72 | 98 |
| 87 | 98 | 74 | 100 |
| 90 | 102 | 73 | 49 |
| 93 | 48 | 25 | 50 |
| 96 | 29 | 27 | 28 |
| 99 | 54 | 29 | 31 |
| 102 | 33 | 31 | 32 |
| 105 | 58 | 35 | 37 |
| 108 | 62 | 37 | 39 |
| 111 | 62 | 41 | 64 |
| 114 | 65 | 66 | 67 |
| 117 | 69 | 43 | 68 |
| 120 | 96 | 95 | 124 |
| 123 | 126 | 97 | 99 |
| 126 | 127 | 99 | 98 |
| 129 | 101 | 100 | 103 |
| 132 | 76 | 102 | 75 |
| 135 | 77 | 49 | 51 |
| 138 | 51 | 50 | 52 |
| 141 | 55 | 52 | 54 |
| 144 | 57 | 56 | 58 |
| 147 | 59 | 60 | 61 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 148 | 61 | 60 | 63 | 149 | 63 | 60 | 62 | 150 | 63 | 62 | 64 |
| 151 | 63 | 64 | 65 | 152 | 63 | 65 | 63 | 153 | 88 | 65 | 91 |
| 154 | 91 | 65 | 67 | 155 | 91 | 67 | 93 | 156 | 93 | 67 | 69 |
| 157 | 93 | 69 | 96 | 158 | 93 | 96 | 94 | 159 | 94 | 96 | 122 |
| 160 | 122 | 96 | 125 | 161 | 125 | 96 | 124 | 162 | 125 | 124 | 149 |
| 163 | 149 | 124 | 126 | 164 | 149 | 126 | 151 | 165 | 151 | 126 | 128 |
| 166 | 151 | 128 | 152 | 167 | 152 | 128 | 130 | 168 | 130 | 128 | 127 |
| 169 | 130 | 127 | 101 | 170 | 130 | 101 | 129 | 171 | 129 | 101 | 103 |
| 172 | 129 | 103 | 104 | 173 | 104 | 103 | 76 | 174 | 104 | 76 | 79 |
| 175 | 79 | 76 | 78 | 176 | 78 | 76 | 75 | 177 | 78 | 75 | 77 |
| 178 | 78 | 77 | 80 | 179 | 80 | 77 | 53 | 180 | 53 | 77 | 51 |
| 181 | 80 | 53 | 82 | 182 | 82 | 53 | 55 | 183 | 82 | 55 | 57 |
| 184 | 82 | 57 | 84 | 185 | 84 | 57 | 59 | 186 | 84 | 59 | 61 |
| 187 | 84 | 61 | 86 | 188 | 86 | 61 | 88 | 189 | 88 | 61 | 63 |
| 190 | 86 | 88 | 89 | 191 | 89 | 88 | 91 | 192 | 89 | 91 | 92 |
| 193 | 92 | 91 | 94 | 194 | 94 | 91 | 93 | 195 | 92 | 94 | 120 |
| 196 | 120 | 94 | 122 | 197 | 120 | 122 | 121 | 198 | 121 | 122 | 123 |
| 199 | 123 | 122 | 125 | 200 | 123 | 125 | 147 | 201 | 147 | 125 | 150 |
| 202 | 150 | 125 | 149 | 203 | 150 | 149 | 171 | 204 | 171 | 149 | 151 |
| 205 | 171 | 151 | 172 | 206 | 172 | 151 | 173 | 207 | 173 | 151 | 152 |
| 208 | 173 | 152 | 154 | 209 | 154 | 152 | 130 | 210 | 154 | 130 | 153 |
| 211 | 153 | 130 | 129 | 212 | 153 | 129 | 105 | 213 | 105 | 129 | 104 |
| 214 | 105 | 104 | 107 | 215 | 107 | 104 | 106 | 216 | 106 | 104 | 79 |
| 217 | 106 | 79 | 108 | 218 | 108 | 79 | 81 | 219 | 81 | 79 | 78 |
| 220 | 81 | 78 | 80 | 221 | 81 | 80 | 83 | 222 | 83 | 80 | 82 |
| 223 | 83 | 82 | 85 | 224 | 85 | 82 | 84 | 225 | 85 | 84 | 114 |
| 226 | 114 | 84 | 87 | 227 | 87 | 84 | 86 | 228 | 87 | 86 | 89 |
| 229 | 87 | 89 | 90 | 230 | 90 | 89 | 92 | 231 | 90 | 92 | 120 |
| 232 | 90 | 120 | 118 | 233 | 118 | 120 | 119 | 234 | 119 | 120 | 121 |
| 235 | 119 | 121 | 145 | 236 | 145 | 121 | 148 | 237 | 148 | 121 | 147 |
| 238 | 147 | 121 | 123 | 239 | 148 | 147 | 169 | 240 | 169 | 147 | 150 |
| 241 | 169 | 150 | 171 | 242 | 169 | 171 | 184 | 243 | 184 | 171 | 195 |
| 244 | 185 | 171 | 186 | 245 | 186 | 171 | 172 | 246 | 186 | 172 | 187 |
| 247 | 187 | 172 | 173 | 248 | 187 | 173 | 175 | 249 | 175 | 173 | 154 |
| 250 | 175 | 154 | 174 | 251 | 174 | 154 | 153 | 252 | 174 | 153 | 132 |
| 253 | 132 | 153 | 131 | 254 | 131 | 153 | 105 | 255 | 131 | 105 | 107 |
| 256 | 131 | 107 | 133 | 257 | 133 | 107 | 109 | 258 | 109 | 107 | 106 |
| 259 | 109 | 106 | 108 | 260 | 109 | 108 | 111 | 261 | 111 | 108 | 110 |
| 262 | 110 | 108 | 83 | 263 | 83 | 108 | 81 | 264 | 110 | 83 | 112 |
| 265 | 112 | 83 | 85 | 266 | 112 | 85 | 114 | 267 | 112 | 114 | 113 |
| 268 | 113 | 114 | 115 | 269 | 115 | 114 | 116 | 270 | 116 | 114 | 87 |
| 271 | 116 | 87 | 90 | 272 | 116 | 90 | 118 | 273 | 116 | 118 | 117 |
| 274 | 117 | 118 | 119 | 275 | 117 | 119 | 145 | 276 | 117 | 145 | 143 |
| 277 | 143 | 145 | 144 | 278 | 144 | 145 | 146 | 279 | 146 | 145 | 148 |
| 280 | 146 | 148 | 167 | 281 | 167 | 148 | 170 | 282 | 170 | 148 | 169 |
| 283 | 170 | 169 | 184 | 284 | 170 | 184 | 182 | 285 | 182 | 184 | 192 |
| 286 | 192 | 184 | 193 | 287 | 193 | 184 | 194 | 288 | 194 | 184 | 185 |
| 289 | 194 | 185 | 195 | 290 | 195 | 185 | 186 | 291 | 195 | 186 | 196 |
| 292 | 196 | 186 | 187 | 293 | 196 | 187 | 197 | 294 | 197 | 187 | 188 |
| 295 | 188 | 187 | 175 | 296 | 188 | 175 | 156 | 297 | 156 | 175 | 174 |
| 298 | 156 | 174 | 132 | 299 | 156 | 132 | 155 | 300 | 155 | 132 | 134 |
| 301 | 134 | 132 | 131 | 302 | 134 | 131 | 133 | 303 | 134 | 133 | 136 |
| 304 | 136 | 133 | 135 | 305 | 135 | 133 | 109 | 306 | 135 | 109 | 111 |
| 307 | 135 | 111 | 137 | 308 | 137 | 111 | 113 | 309 | 113 | 111 | 110 |
| 310 | 113 | 110 | 112 | 311 | 113 | 113 | 139 | 312 | 139 | 113 | 141 |
| 313 | 141 | 113 | 115 | 314 | 141 | 115 | 143 | 315 | 143 | 115 | 117 |
| 316 | 117 | 115 | 116 | 317 | 141 | 143 | 142 | 318 | 142 | 143 | 144 |
| 319 | 142 | 144 | 163 | 320 | 163 | 144 | 165 | 321 | 165 | 144 | 167 |
| 322 | 167 | 144 | 146 | 323 | 165 | 167 | 166 | 324 | 166 | 167 | 168 |
| 325 | 168 | 167 | 170 | 326 | 168 | 170 | 182 | 327 | 168 | 182 | 166 |
| 328 | 166 | 182 | 183 | 329 | 183 | 182 | 192 | 330 | 183 | 192 | 191 |

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 331 | 183 | 191 | 181 |
| 334 | 179 | 190 | 189 |
| 337 | 177 | 197 | 188 |
| 340 | 176 | 156 | 155 |
| 343 | 157 | 155 | 136 |
| 346 | 159 | 136 | 138 |
| 349 | 138 | 137 | 139 |
| 352 | 142 | 139 | 141 |
| 355 | 161 | 163 | 162 |
| 358 | 164 | 165 | 166 |
| 361 | 180 | 183 | 181 |
| 364 | 178 | 181 | 179 |
| 367 | 176 | 179 | 177 |
| 370 | 160 | 157 | 159 |
| 373 | 161 | 159 | 140 |
| 376 | 180 | 162 | 164 |

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 332 | 181 | 191 | 190 |
| 335 | 179 | 189 | 177 |
| 338 | 177 | 188 | 156 |
| 341 | 176 | 155 | 158 |
| 344 | 136 | 155 | 134 |
| 347 | 138 | 136 | 135 |
| 350 | 138 | 139 | 140 |
| 353 | 140 | 142 | 163 |
| 356 | 162 | 163 | 164 |
| 359 | 164 | 166 | 180 |
| 362 | 180 | 181 | 162 |
| 365 | 178 | 179 | 158 |
| 368 | 178 | 158 | 160 |
| 371 | 160 | 159 | 162 |
| 374 | 140 | 159 | 138 |

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 333 | 181 | 190 | 179 |
| 336 | 177 | 189 | 197 |
| 339 | 177 | 156 | 176 |
| 342 | 158 | 155 | 157 |
| 345 | 157 | 136 | 159 |
| 348 | 138 | 135 | 137 |
| 351 | 140 | 139 | 142 |
| 354 | 140 | 163 | 161 |
| 357 | 164 | 163 | 165 |
| 360 | 180 | 166 | 183 |
| 363 | 162 | 181 | 178 |
| 366 | 158 | 179 | 176 |
| 369 | 160 | 158 | 157 |
| 372 | 162 | 159 | 161 |
| 375 | 160 | 162 | 178 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 1      *
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 194.5038 | 194.5038 |
| 2 | 97.2519 | 97.2519 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESvio EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESvio MEDIO | DESvio MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.31938 | 0.55833 | 491 |
| 1 | 0.25129 | 0.48541 | 622 |
| 2 | 0.24671 | 0.53121 | 487 |
| 3 | 0.24404 | 0.53434 | 487 |

 *
 * PONTOS GERADOS *
 *

*** COORDENADAS DOS PONTOS
 NUM. DE PONTOS= 145

| PONTO | COORD. X | COORD. Y | COORD. Z | PONTO | COORD. X | COORD. Y | COORD. Z |
|-------|-----------|----------|-----------|-------|-----------|----------|-----------|
| 56 | 501.2324 | 271.4622 | 0.0014 | 58 | 510.1282 | 255.5774 | 91.4983 |
| 60 | 536.9763 | 211.6194 | 170.0264 | 63 | 584.3865 | 152.9698 | 224.2588 |
| 88 | 665.3301 | 112.8742 | 246.8830 | 89 | 760.1077 | 119.2251 | 243.8795 |
| 90 | 848.8176 | 142.5803 | 231.0035 | 118 | 935.6763 | 171.3281 | 210.5670 |
| 117 | 1019.3865 | 201.5843 | 181.8121 | 143 | 1078.0256 | 231.2563 | 142.1698 |
| 142 | 1166.7786 | 257.8162 | 84.9850 | 140 | 1201.6917 | 271.4619 | -0.0003 |
| 138 | 1166.7788 | 257.8162 | -84.9835 | 135 | 1098.0261 | 231.2564 | -142.1687 |
| 109 | 1019.3867 | 201.5845 | -181.8113 | 106 | 935.6768 | 171.3287 | -210.5663 |
| 79 | 848.8181 | 142.5809 | -231.0031 | 78 | 760.1082 | 119.2257 | -243.8792 |
| 77 | 665.3298 | 112.8753 | -246.8826 | 51 | 584.3862 | 152.9708 | -224.2582 |
| 52 | 536.9761 | 211.6202 | -170.0255 | 54 | 510.1282 | 255.5773 | -91.4971 |
| ----- | | | | | | | |
| 198 | 679.1738 | 192.7035 | -238.4556 | 199 | 773.2834 | 227.6645 | -246.4535 |
| 200 | 614.6323 | 251.6570 | -194.3722 | 201 | 696.4971 | 283.2017 | -217.7960 |
| 202 | 571.1927 | 287.2703 | -132.2920 | 203 | 651.7766 | 361.4944 | -139.1478 |
| 204 | 571.6990 | 335.2952 | -47.9713 | 205 | 626.8706 | 388.7830 | -53.6505 |
| 206 | 564.6902 | 324.3657 | 60.3382 | 207 | 634.1628 | 402.3909 | 26.4379 |
| 208 | 586.3047 | 287.9849 | 147.6462 | 209 | 628.6768 | 356.7146 | 117.8423 |
| 210 | 614.9319 | 235.7238 | 202.9085 | 211 | 698.5508 | 320.7278 | 202.2197 |
| 212 | 682.6348 | 195.9191 | 238.7040 | 213 | 784.2698 | 223.1452 | 247.2902 |
| 214 | 789.2585 | 363.3157 | -222.4039 | 215 | 938.9033 | 380.8882 | -247.1610 |
| 216 | 673.1431 | 434.3020 | -55.9967 | 217 | 754.4915 | 475.1472 | -127.0172 |
| 218 | 692.2739 | 421.0229 | 116.9080 | 219 | 739.9143 | 509.1321 | 18.8125 |
| 220 | 845.5254 | 327.2649 | 243.7719 | 221 | 812.2197 | 474.2397 | 179.0378 |
| 222 | 877.3726 | 228.1670 | 242.7672 | 223 | 967.2468 | 282.6235 | 236.3422 |
| 224 | 879.0461 | 259.9702 | -246.1033 | 225 | 987.0105 | 278.3799 | -230.3418 |
| 226 | 893.4536 | 500.9316 | -209.1798 | 227 | 1049.9919 | 486.7979 | -247.3640 |
| 228 | 864.0293 | 605.5906 | -98.1297 | 229 | 879.2808 | 635.5972 | 69.1096 |
| 230 | 955.3696 | 420.8782 | 245.5508 | 231 | 981.1191 | 526.3543 | 210.1733 |
| 232 | 1046.9875 | 362.5029 | 236.3730 | 233 | 1093.5588 | 475.2734 | 246.1664 |
| 234 | 1071.6145 | 284.3503 | 199.6283 | 235 | 1136.3394 | 357.6348 | 203.9336 |
| 236 | 1141.4421 | 288.6086 | 155.2791 | 237 | 1215.3501 | 331.9312 | 123.6893 |
| 238 | 1250.9390 | 331.5193 | -61.0532 | 239 | 1147.3086 | 296.4192 | -156.9706 |
| 240 | 1207.9641 | 330.3887 | -130.5938 | 241 | 1082.1799 | 292.4534 | -198.3371 |
| 242 | 1170.7273 | 384.0212 | -199.9164 | 243 | 1058.2056 | 374.4619 | -236.5351 |
| 244 | 1110.9666 | 429.6875 | -237.0685 | 245 | 1024.5732 | 630.6538 | -209.8026 |
| 246 | 1187.1890 | 578.8994 | -246.8399 | 247 | 1014.1228 | 769.1777 | -72.1075 |
| 248 | 1005.7732 | 736.4683 | 114.3016 | 249 | 1094.6047 | 589.1604 | 241.9742 |
| 250 | 1101.3750 | 704.1516 | 211.2513 | 251 | 1219.8088 | 433.3025 | 200.0206 |
| 252 | 1209.5266 | 589.1389 | 245.9985 | 253 | 1276.4089 | 402.5161 | 134.7007 |
| 254 | 1342.3286 | 492.2451 | 157.6642 | 255 | 1304.0968 | 378.9312 | 42.3324 |
| 256 | 1369.9124 | 449.6638 | 58.7038 | 257 | 1309.9307 | 386.2253 | -47.5789 |
| 258 | 1379.2244 | 452.1406 | -33.1196 | 259 | 1285.7307 | 400.0564 | -120.8800 |
| 260 | 1348.8867 | 465.7673 | -124.0547 | 261 | 1162.6123 | 472.9551 | -235.1974 |
| 262 | 1286.2908 | 484.5357 | -193.9618 | 263 | 1226.3186 | 753.4080 | -235.7379 |
| 264 | 1185.6682 | 899.2598 | -135.0266 | 265 | 1150.6890 | 901.0942 | 82.1385 |
| 266 | 1228.8608 | 773.9187 | 231.3247 | 267 | 1359.0652 | 688.2515 | 239.1806 |
| 268 | 1419.3154 | 504.3809 | 72.3878 | 269 | 1463.0149 | 606.4578 | 151.9503 |
| 270 | 1421.9412 | 531.7554 | -114.9900 | 271 | 1489.8528 | 560.8274 | 20.5237 |

| | | | | | | | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|
| 272 | 1377.8157 | 619.4077 | -213.1090 | 273 | 1382.1729 | 914.5745 | -234.5483 |
| 274 | 1299.0757 | 1028.0718 | -116.5798 | 275 | 1305.3564 | 1070.8201 | 40.7178 |
| 276 | 1369.5112 | 950.1501 | 220.0647 | 277 | 1492.3411 | 768.1511 | 225.6892 |
| 278 | 1583.8926 | 698.2761 | 120.9547 | 279 | 1569.9775 | 656.8826 | -76.5125 |
| 280 | 1497.6494 | 766.0684 | -223.2522 | 281 | 1511.6768 | 1058.1465 | -230.9386 |
| 282 | 1430.8357 | 1163.3770 | -111.7544 | 283 | 1425.8113 | 1182.5625 | 68.0425 |
| 284 | 1511.2610 | 1137.5593 | 200.1286 | 285 | 1634.3667 | 944.9795 | 235.2623 |
| 286 | 1704.0627 | 788.3311 | 70.5185 | 287 | 1712.5371 | 811.9675 | -99.7386 |
| 288 | 1625.0483 | 916.3247 | -230.3150 | 289 | 1634.4260 | 1197.1106 | -226.1644 |
| 290 | 1556.0061 | 1295.9849 | -100.6822 | 291 | 1558.5425 | 1311.6597 | 76.4662 |
| 292 | 1644.7629 | 1234.4656 | 216.6369 | 293 | 1777.1460 | 1139.5137 | 244.2754 |
| 294 | 1869.9141 | 971.3423 | 102.8923 | 295 | 1822.3870 | 945.8369 | -131.7542 |
| 296 | 1753.3547 | 1059.6121 | -234.2245 | 297 | 1758.5591 | 1334.6567 | -221.6902 |
| 298 | 1631.3639 | 1428.1130 | -89.1587 | 299 | 1690.8701 | 1438.9915 | 86.5956 |
| 300 | 1782.3784 | 1363.0078 | 220.0687 | 301 | 1914.9727 | 1235.4043 | 237.4330 |
| 302 | 2027.7488 | 1159.3066 | 140.4690 | 303 | 2008.9954 | 1104.8123 | -95.7176 |
| 304 | 1847.9126 | 1198.7598 | -242.7729 | 305 | 1857.6704 | 1469.6941 | -207.1066 |
| 306 | 1819.2307 | 1565.3545 | -88.4601 | 307 | 1826.8843 | 1573.1509 | 90.0326 |
| 308 | 1919.6785 | 1487.8804 | 224.3866 | 309 | 2053.5298 | 1362.8948 | 234.9708 |
| 310 | 2155.0645 | 1262.5427 | 111.7859 | 311 | 2185.7251 | 1264.3809 | -55.4295 |
| 312 | 2041.1440 | 1338.4905 | -231.9650 | 313 | 2057.3074 | 1611.3350 | -228.7966 |
| 314 | 1962.5361 | 1706.1062 | -94.7691 | 315 | 1962.5361 | 1706.1057 | 94.7738 |
| 316 | 2057.3076 | 1611.3340 | 228.8007 | 317 | 2191.3347 | 1477.3069 | 228.8005 |
| 318 | 2286.1062 | 1382.5356 | 94.7734 | 319 | 2286.1064 | 1382.5356 | -94.7695 |
| 320 | 2191.3350 | 1477.3074 | -228.7967 | | | | |

 *
 * ELEMENTOS GERADOS *
 *

*** CONECTIVIDADE DOS ELEMENTOS
 NUM. DE ELEMENTOS= 260

| ELEMENTO | VERT. 1 | VERT. 2 | VERT. 3 | ELEMENTO | VERT. 1 | VERT. 2 | VERT. 3 | ELEMENTO | VERT. 1 | VERT. 2 | VERT. 3 |
|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 377 | 320 | 313 | 312 | 378 | 312 | 313 | 305 | 379 | 305 | 313 | 306 |
| 380 | 306 | 313 | 314 | 381 | 306 | 314 | 307 | 382 | 307 | 314 | 315 |
| 383 | 307 | 315 | 308 | 384 | 308 | 315 | 316 | 385 | 308 | 316 | 309 |
| 386 | 309 | 316 | 317 | 387 | 309 | 317 | 310 | 388 | 310 | 317 | 318 |
| 389 | 310 | 318 | 311 | 390 | 311 | 318 | 319 | 391 | 311 | 319 | 312 |
| 392 | 312 | 319 | 320 | 393 | 311 | 312 | 303 | 394 | 303 | 312 | 304 |
| 395 | 304 | 312 | 297 | 396 | 297 | 312 | 305 | 397 | 297 | 305 | 298 |
| 398 | 298 | 305 | 306 | 399 | 298 | 306 | 299 | 400 | 299 | 306 | 307 |
| 401 | 299 | 307 | 300 | 402 | 300 | 307 | 308 | 403 | 300 | 308 | 301 |
| 404 | 301 | 308 | 309 | 405 | 301 | 309 | 302 | 406 | 302 | 309 | 310 |
| 407 | 302 | 310 | 303 | 408 | 303 | 310 | 311 | 409 | 302 | 303 | 294 |
| 410 | 294 | 303 | 295 | 411 | 295 | 303 | 296 | 412 | 296 | 303 | 304 |
| 413 | 296 | 304 | 289 | 414 | 289 | 304 | 297 | 415 | 289 | 297 | 290 |
| 416 | 290 | 297 | 298 | 417 | 290 | 298 | 291 | 418 | 291 | 298 | 299 |
| 419 | 291 | 299 | 292 | 420 | 292 | 299 | 300 | 421 | 292 | 300 | 293 |
| 422 | 293 | 300 | 301 | 423 | 293 | 301 | 294 | 424 | 294 | 301 | 302 |
| 425 | 293 | 294 | 285 | 426 | 285 | 294 | 286 | 427 | 286 | 294 | 287 |
| 428 | 287 | 294 | 295 | 429 | 287 | 295 | 288 | 430 | 288 | 295 | 296 |
| 431 | 288 | 296 | 281 | 432 | 281 | 296 | 289 | 433 | 281 | 289 | 282 |
| 434 | 282 | 289 | 290 | 435 | 282 | 290 | 283 | 436 | 283 | 290 | 291 |
| 437 | 283 | 291 | 284 | 438 | 284 | 291 | 292 | 439 | 284 | 292 | 285 |
| 440 | 285 | 292 | 293 | 441 | 284 | 285 | 276 | 442 | 276 | 285 | 277 |
| 443 | 277 | 285 | 278 | 444 | 278 | 285 | 286 | 445 | 278 | 286 | 279 |
| 446 | 279 | 286 | 287 | 447 | 279 | 287 | 280 | 448 | 280 | 287 | 288 |
| 449 | 280 | 288 | 273 | 450 | 273 | 288 | 281 | 451 | 273 | 281 | 274 |
| 452 | 274 | 281 | 282 | 453 | 274 | 282 | 275 | 454 | 275 | 282 | 283 |
| 455 | 275 | 283 | 276 | 456 | 276 | 283 | 284 | 457 | 275 | 276 | 265 |
| 458 | 265 | 276 | 266 | 459 | 266 | 276 | 267 | 460 | 267 | 276 | 277 |
| 461 | 267 | 277 | 269 | 462 | 269 | 277 | 278 | 463 | 269 | 278 | 271 |
| 464 | 271 | 278 | 279 | 465 | 271 | 279 | 270 | 466 | 270 | 279 | 272 |
| 467 | 272 | 279 | 280 | 468 | 272 | 280 | 263 | 469 | 263 | 280 | 273 |
| 470 | 263 | 273 | 264 | 471 | 264 | 273 | 274 | 472 | 264 | 274 | 265 |
| 473 | 265 | 274 | 275 | 474 | 264 | 265 | 247 | 475 | 247 | 265 | 248 |
| 476 | 248 | 265 | 250 | 477 | 250 | 265 | 266 | 478 | 250 | 266 | 252 |
| 479 | 252 | 266 | 267 | 480 | 252 | 267 | 254 | 481 | 254 | 267 | 269 |
| 482 | 254 | 269 | 268 | 483 | 268 | 269 | 271 | 484 | 268 | 271 | 253 |
| 485 | 258 | 271 | 270 | 486 | 258 | 270 | 260 | 487 | 260 | 270 | 262 |
| 488 | 262 | 270 | 272 | 489 | 262 | 272 | 246 | 490 | 246 | 272 | 263 |
| 491 | 246 | 263 | 245 | 492 | 245 | 263 | 247 | 493 | 247 | 263 | 264 |
| 494 | 245 | 247 | 228 | 495 | 228 | 247 | 229 | 496 | 229 | 247 | 248 |
| 497 | 229 | 248 | 231 | 498 | 231 | 248 | 250 | 499 | 231 | 250 | 249 |
| 500 | 249 | 250 | 252 | 501 | 249 | 252 | 233 | 502 | 233 | 252 | 251 |
| 503 | 251 | 252 | 254 | 504 | 251 | 254 | 253 | 505 | 253 | 254 | 255 |
| 506 | 255 | 254 | 256 | 507 | 256 | 254 | 268 | 508 | 256 | 268 | 258 |
| 509 | 256 | 258 | 255 | 510 | 255 | 258 | 257 | 511 | 257 | 258 | 259 |
| 512 | 259 | 258 | 260 | 513 | 259 | 260 | 262 | 514 | 259 | 262 | 242 |
| 515 | 242 | 262 | 261 | 516 | 261 | 262 | 246 | 517 | 261 | 246 | 227 |
| 518 | 227 | 246 | 245 | 519 | 227 | 245 | 226 | 520 | 226 | 245 | 228 |
| 521 | 226 | 228 | 217 | 522 | 217 | 228 | 219 | 523 | 219 | 228 | 229 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 524 | 219 | 229 | 221 | 525 | 221 | 229 | 231 | 526 | 221 | 231 | 230 |
| 527 | 230 | 231 | 233 | 528 | 233 | 231 | 249 | 529 | 230 | 233 | 232 |
| 530 | 232 | 233 | 235 | 531 | 235 | 233 | 251 | 532 | 235 | 251 | 237 |
| 533 | 237 | 251 | 253 | 534 | 237 | 253 | 255 | 535 | 237 | 255 | 140 |
| 536 | 140 | 255 | 238 | 537 | 238 | 255 | 257 | 538 | 238 | 257 | 259 |
| 539 | 238 | 259 | 240 | 540 | 240 | 259 | 242 | 541 | 240 | 242 | 239 |
| 542 | 239 | 242 | 241 | 543 | 241 | 242 | 243 | 544 | 243 | 242 | 244 |
| 545 | 244 | 242 | 261 | 546 | 244 | 241 | 227 | 547 | 244 | 227 | 243 |
| 548 | 243 | 227 | 215 | 549 | 215 | 227 | 226 | 550 | 215 | 226 | 214 |
| 551 | 214 | 226 | 217 | 552 | 214 | 217 | 203 | 553 | 203 | 217 | 216 |
| 554 | 216 | 217 | 219 | 555 | 216 | 219 | 207 | 556 | 207 | 219 | 218 |
| 557 | 218 | 219 | 221 | 558 | 218 | 221 | 211 | 559 | 211 | 221 | 220 |
| 560 | 220 | 221 | 230 | 561 | 220 | 230 | 223 | 562 | 223 | 230 | 232 |
| 563 | 223 | 232 | 234 | 564 | 234 | 232 | 235 | 565 | 234 | 235 | 236 |
| 566 | 236 | 235 | 237 | 567 | 236 | 237 | 142 | 568 | 142 | 237 | 140 |
| 569 | 236 | 142 | 143 | 570 | 236 | 143 | 234 | 571 | 234 | 143 | 117 |
| 572 | 234 | 117 | 223 | 573 | 223 | 117 | 118 | 574 | 223 | 118 | 222 |
| 575 | 222 | 118 | 90 | 576 | 222 | 90 | 213 | 577 | 213 | 90 | 89 |
| 578 | 213 | 89 | 212 | 579 | 212 | 89 | 88 | 580 | 212 | 88 | 63 |
| 581 | 212 | 63 | 210 | 582 | 210 | 63 | 60 | 583 | 210 | 60 | 208 |
| 584 | 208 | 60 | 58 | 585 | 208 | 58 | 206 | 586 | 206 | 58 | 56 |
| 587 | 206 | 56 | 204 | 588 | 204 | 56 | 54 | 589 | 204 | 54 | 202 |
| 590 | 202 | 54 | 52 | 591 | 202 | 52 | 200 | 592 | 200 | 52 | 51 |
| 593 | 200 | 51 | 198 | 594 | 198 | 51 | 77 | 595 | 198 | 77 | 78 |
| 596 | 198 | 78 | 199 | 597 | 199 | 78 | 79 | 598 | 199 | 79 | 224 |
| 599 | 224 | 79 | 106 | 600 | 224 | 106 | 225 | 601 | 225 | 106 | 109 |
| 602 | 225 | 109 | 241 | 603 | 241 | 109 | 135 | 604 | 241 | 135 | 239 |
| 605 | 239 | 135 | 138 | 606 | 239 | 138 | 240 | 607 | 240 | 138 | 238 |
| 608 | 238 | 138 | 140 | 609 | 225 | 241 | 243 | 610 | 225 | 243 | 215 |
| 611 | 225 | 215 | 224 | 612 | 224 | 215 | 214 | 613 | 224 | 214 | 199 |
| 614 | 199 | 214 | 201 | 615 | 201 | 214 | 203 | 616 | 201 | 203 | 200 |
| 617 | 200 | 203 | 202 | 618 | 202 | 203 | 204 | 619 | 204 | 203 | 205 |
| 620 | 205 | 203 | 216 | 621 | 205 | 216 | 207 | 622 | 205 | 207 | 204 |
| 623 | 204 | 207 | 206 | 624 | 206 | 207 | 209 | 625 | 209 | 207 | 218 |
| 626 | 209 | 218 | 211 | 627 | 209 | 211 | 208 | 628 | 208 | 211 | 210 |
| 629 | 210 | 211 | 212 | 630 | 212 | 211 | 213 | 631 | 213 | 211 | 220 |
| 632 | 213 | 220 | 222 | 633 | 222 | 220 | 223 | 634 | 209 | 208 | 206 |
| 635 | 201 | 200 | 198 | 636 | 201 | 198 | 199 | | | | |

```

*****
*                                     *
*   RESUMO GLOBAL   *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   PONTOS GERADOS *
*                                     *
*****

```

*** TOTAL DE PONTOS GERADOS = 320

```

*** TUBO PRINCIPAL
PONTOS DE INTERSECAO= 22
OUTROS PONTOS.....= 175
TOTAL DE PONTOS.....= 197

```

```

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1
PONTOS DE INTERSECAO= 22
OUTROS PONTOS.....= 123
TOTAL DE PONTOS.....= 145

```

```

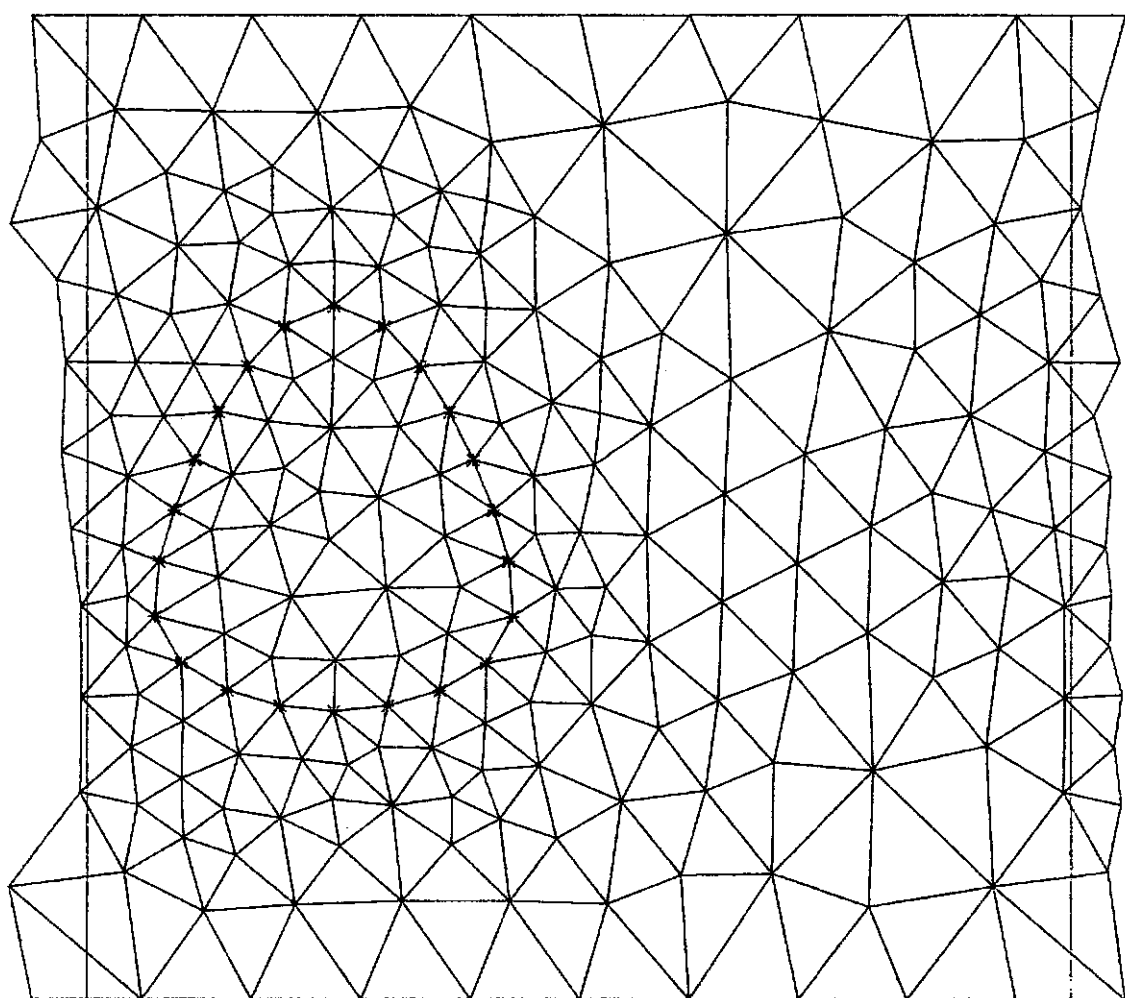
*****
*                                     *
*   ELEMENTOS GERADOS *
*                                     *
*****

```

*** TOTAL DE ELEMENTOS GERADOS = 636

*** TUBO PRINCIPAL.....= 376

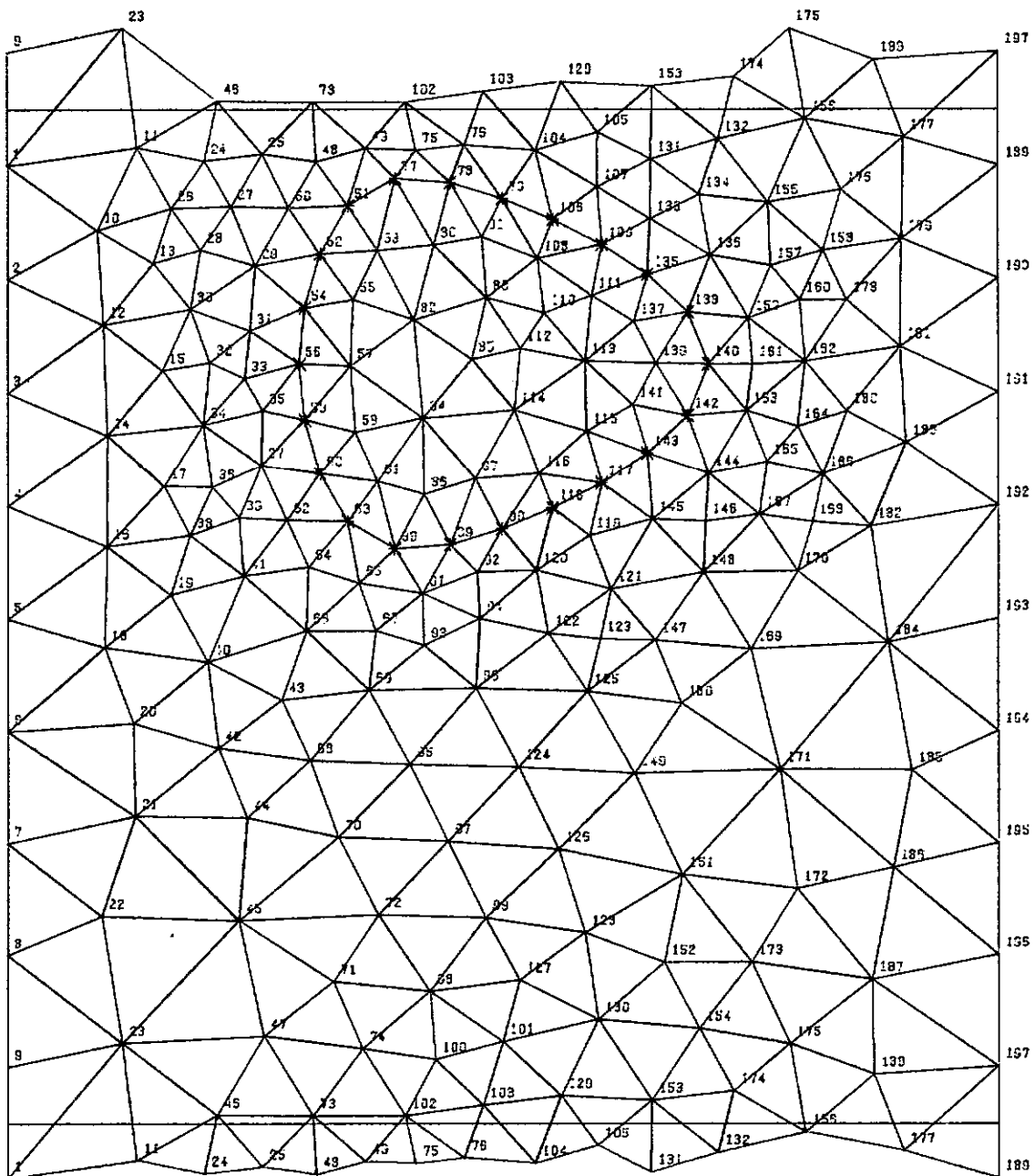
*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1.....= 260



TUBO PRINCIPAL

* GEMAT *

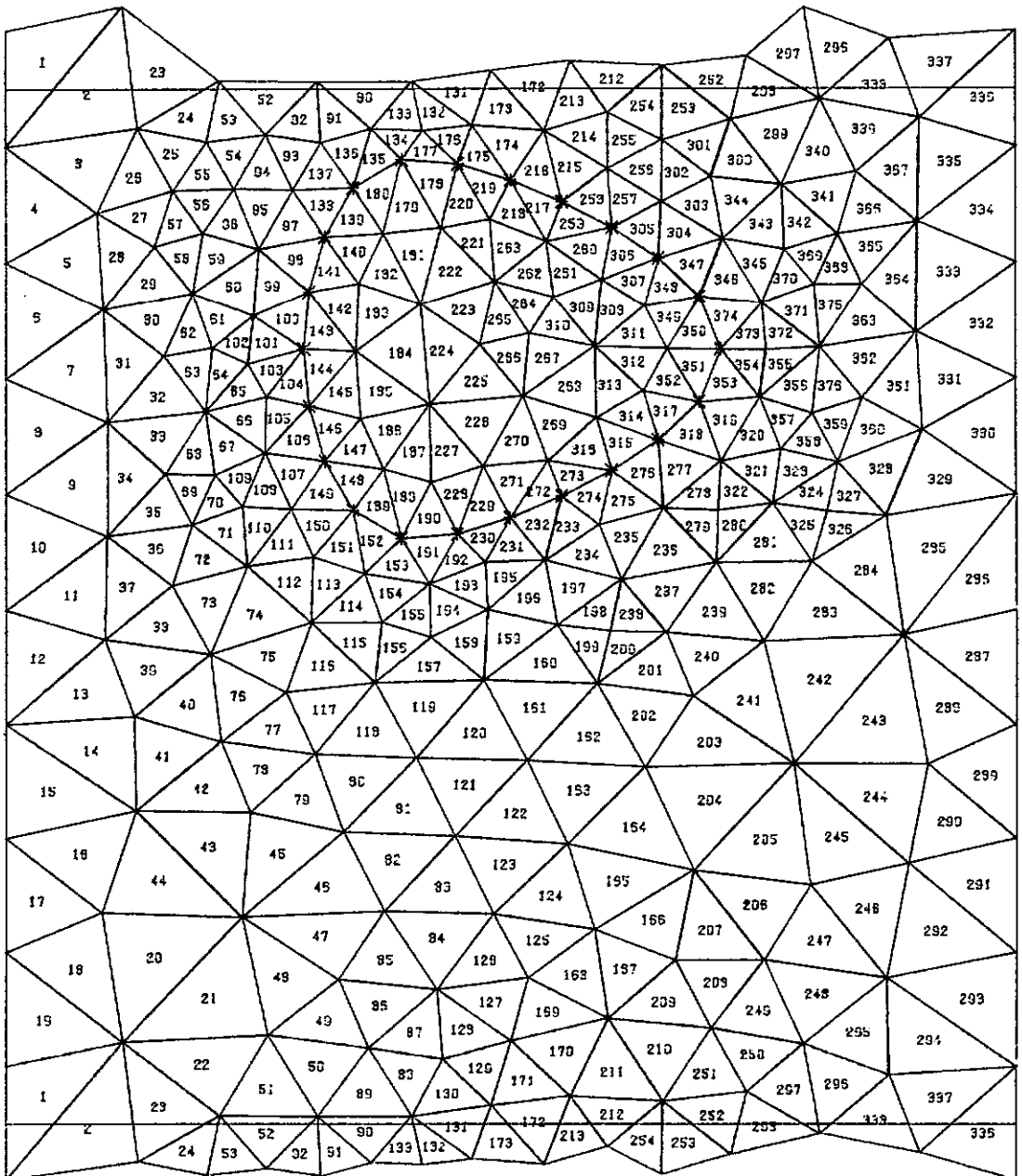
EXEMPLO UM - JUNTA Y - DISPI=100 MM 2 NIVEIS 3 REGUL.
TUBO PRINCIPAL

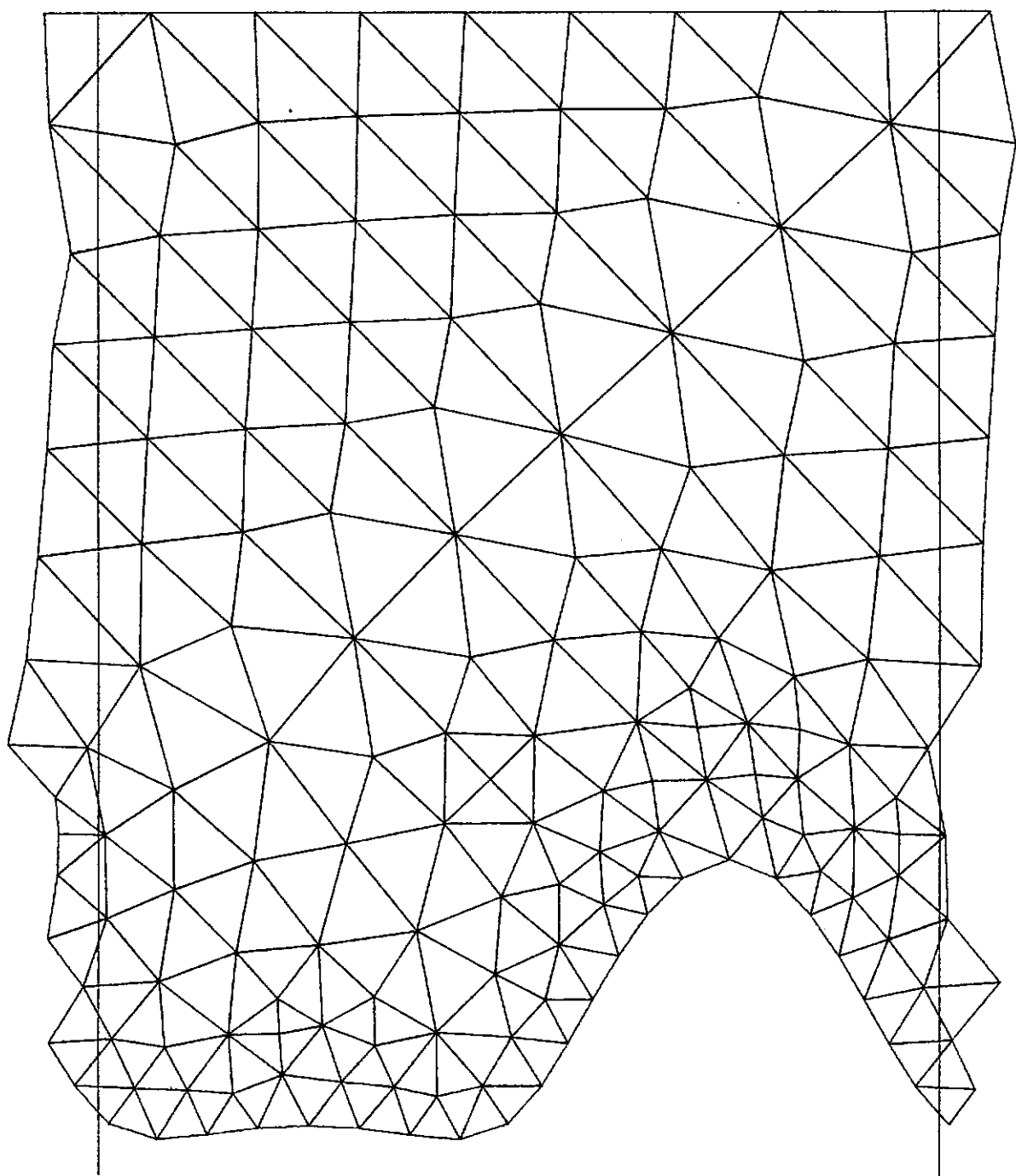


* GEMAT *

EXEMPLO UM - JUNTA Y - DISPI=100 MM 2 NIVEIS 3 REGUL.

TUBO PRINCIPAL



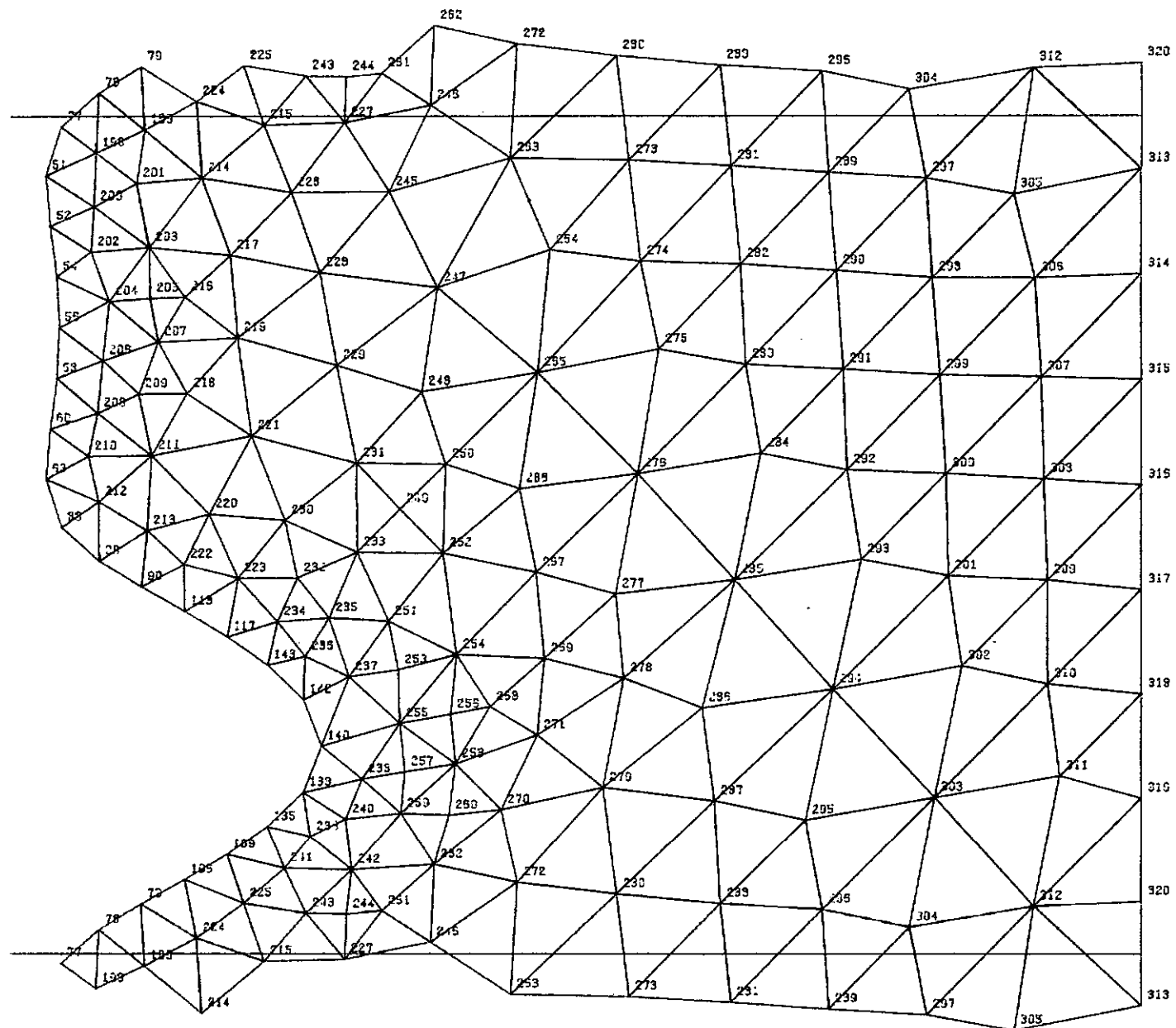


TUBO SECUNDARIO NUM. 1

* GEMAT *

EXEMPLO UM - JUNTA Y - DISPI=100 MM 2 NIVEIS 3 REGUL.

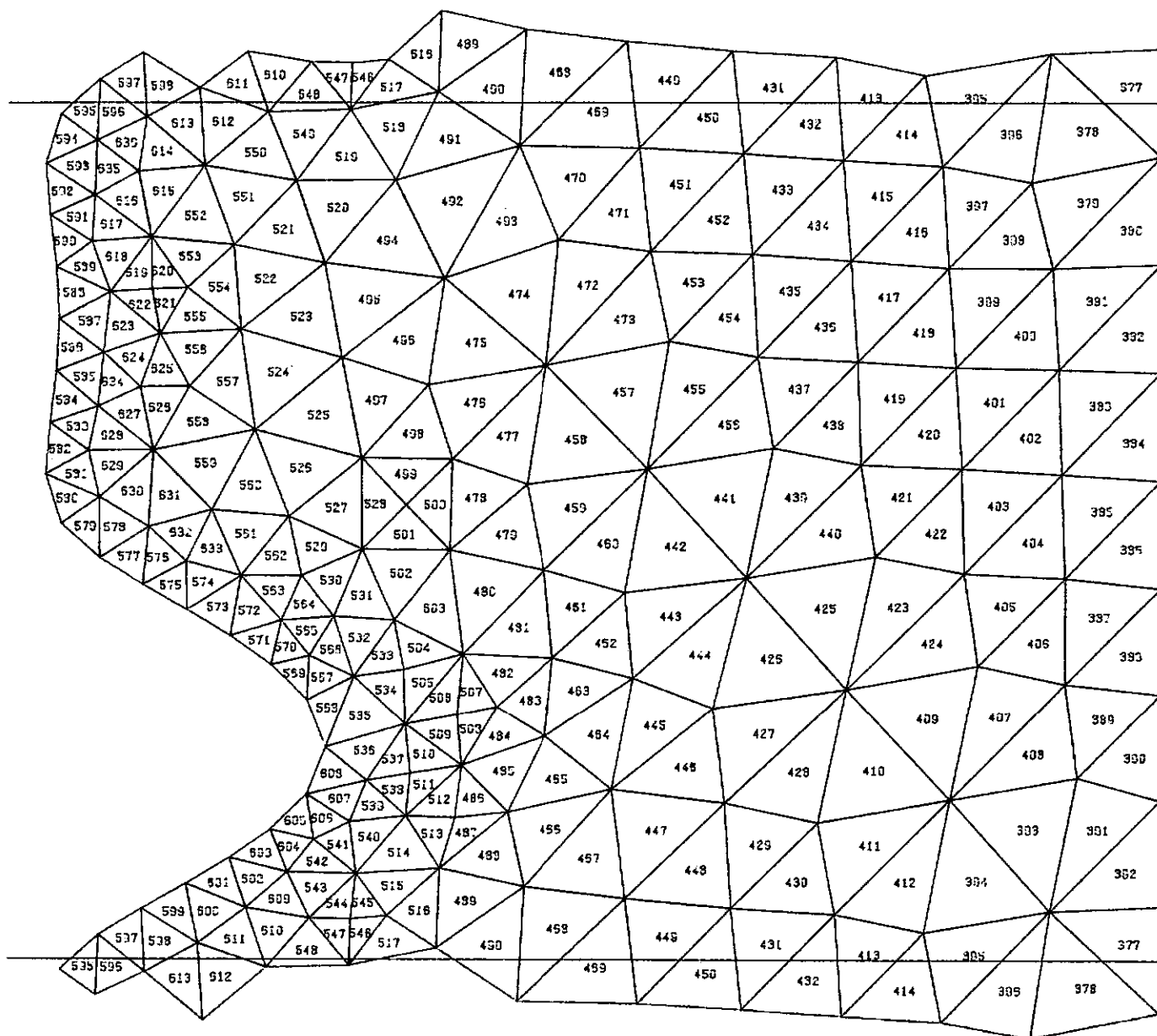
TUBO SECUNDARIO NUM. 1



* GEMAT *

EXEMPLO UM - JUNTA Y - DISPI=100 MM 2 NIVEIS 3 REGUL.

TUBO SECUNDARIO NUM. 1




```

*****
*                                     *
*               * GEMAT *           *
*                                     *
*          GERACAO AUTOMATICA        *
* * DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS *
*          EM JUNTAS TUBULARES      *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*                                     *
* * EXEMPLO DOIS - JUNTA ESPACIAL GENERICA - DISPI=70 MM 3 NIVEIS 3 REGUL. *
*                                     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   DADOS DE ENTRADA               *
*                                     *
*****

```

*** TUBO PRINCIPAL

DIAMETRO...= 200.0000
 COMPRIMENTO= 3100.0000

*** INTERSECAO NUMERO 1

DIAMETRO...= 400.0000
 COMPRIMENTO= 2000.0000
 ANGULO.....= 90.0000
 COORD. X...= 1250.0000
 COORD. ANG.= 30.0000

*** INTERSECAO NUMERO 2

DIAMETRO...= 700.0000
 COMPRIMENTO= 3000.0000
 ANGULO.....= 60.0000
 COORD. X...= 1600.0000
 COORD. ANG.= 135.0000

*** DISTANCIA ENTRE PONTOS DE INTERSECAO

VALOR FORNECIDO.....= 70.0000
 VALOR MEDIO ADOTADO= 70.1339

*** DISTANCIAS PARA OS NIVEIS
 LIMITES INFERIORES

| NUM. DO NIVEL | P/ UM PONTO | P/ DOIS PONTOS |
|---------------|-------------|----------------|
| 1 | 800.0000 | 500.0000 |
| 2 | 270.0000 | 120.0000 |
| 3 | 0.0 | 0.0 |

*** REGULARIZACAO DA MALHA
 NUM. DE REGULARIZACOES=3

*** PLOTAGEM DA MALHA - OPCA0=1000
 IDENTIFICACAO DO ARQUIVO = 15

PLOTAGEM REDUZIDA SOLICITADA

PLOTAGEM NORMAL NAO SOLICITADA

*** ARQUIVO DE SAIDA DA MALHA= 0
 SAIDA NAO SOLICITADA

```

*****
*                                     *
*           TUBO PRINCIPAL           *
*                                     *
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 281.8181 | 279.2527 |
| 2 | 140.9091 | 139.6263 |
| 3 | 70.4545 | 69.8132 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENT |
|--------------------|--------------|-------------|--------------|
| 0 | 0.31586 | 0.58397 | 712 |
| 1 | 0.22984 | 0.56895 | 719 |
| 2 | 0.22372 | 0.53102 | 719 |
| 3 | 0.22239 | 0.52265 | 719 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 1
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 251.3274 | 251.3274 |
| 2 | 125.6637 | 125.6637 |
| 3 | 62.8318 | 62.8318 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.32793 | 0.73970 | 1084 |
| 1 | 0.25425 | 0.51654 | 1075 |
| 2 | 0.24647 | 0.46249 | 1102 |
| 3 | 0.24436 | 0.48742 | 1100 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 2
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 274.8892 | 274.8892 |
| 2 | 137.4446 | 137.4446 |
| 3 | 68.7223 | 68.7223 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.32074 | 0.55833 | 1236 |
| 1 | 0.24571 | 0.55213 | 1340 |
| 2 | 0.23998 | 0.58368 | 1533 |
| 3 | 0.23797 | 0.59935 | 1533 |

```

*****
*                               *
*   RESUMO GLOBAL             *
*                               *
*****

```

```

*****
*                               *
* PONTOS GERADOS             *
*                               *
*****

```

*** TOTAL DE PONTOS GERADOS= 756

*** TUBO PRINCIPAL
 PONTOS DE INTERSECAO= 54
 OUTROS PONTOS.....= 408
 TOTAL DE PONTOS.....= 462

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1
 PONTOS DE INTERSECAO= 18
 OUTROS PONTOS.....= 100
 TOTAL DE PONTOS.....= 118

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 2
 PONTOS DE INTERSECAO= 36
 OUTROS PONTOS.....= 194
 TOTAL DE PONTOS.....= 230

```

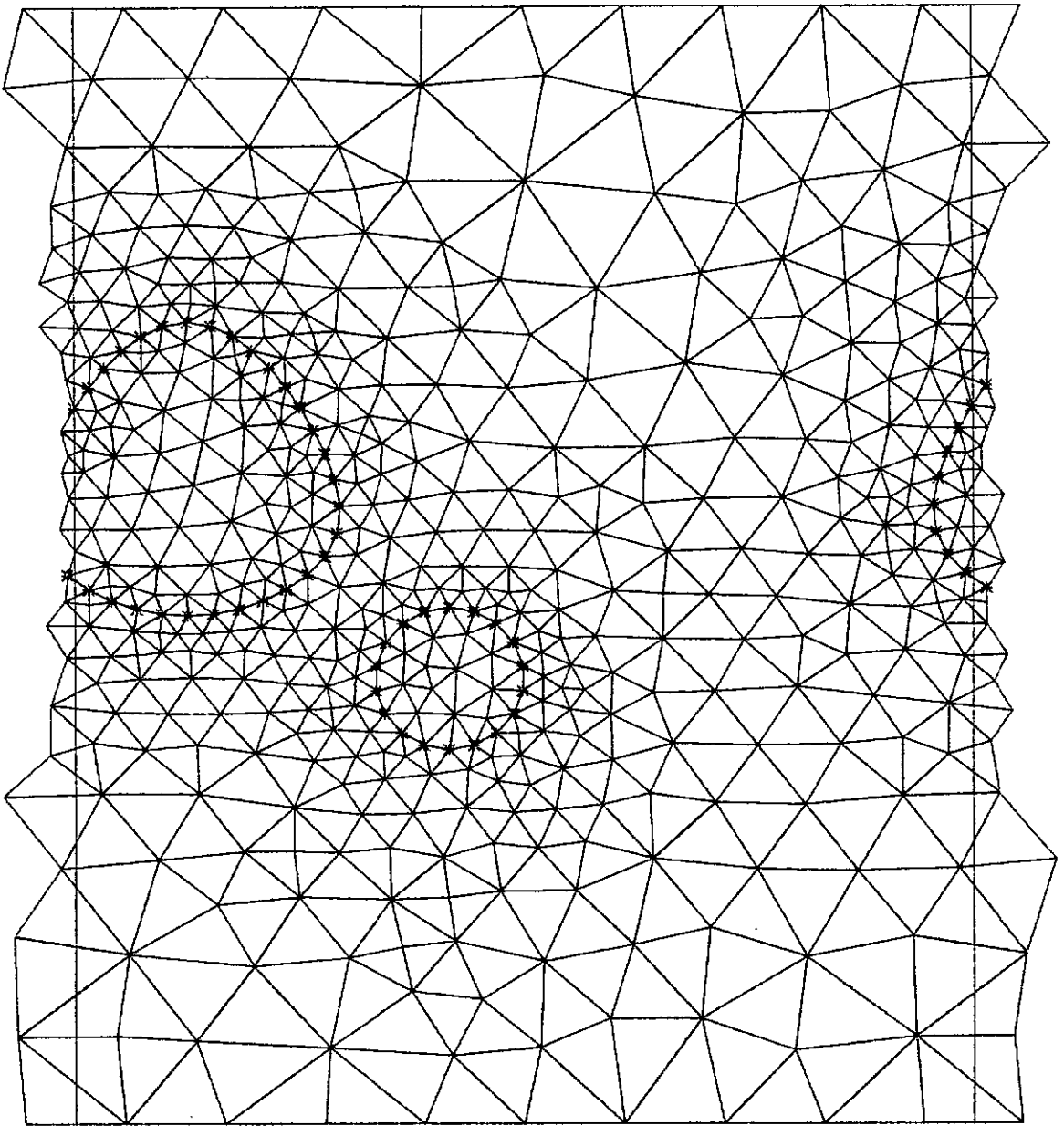
*****
*                               *
* ELEMENTOS GERADOS         *
*                               *
*****

```

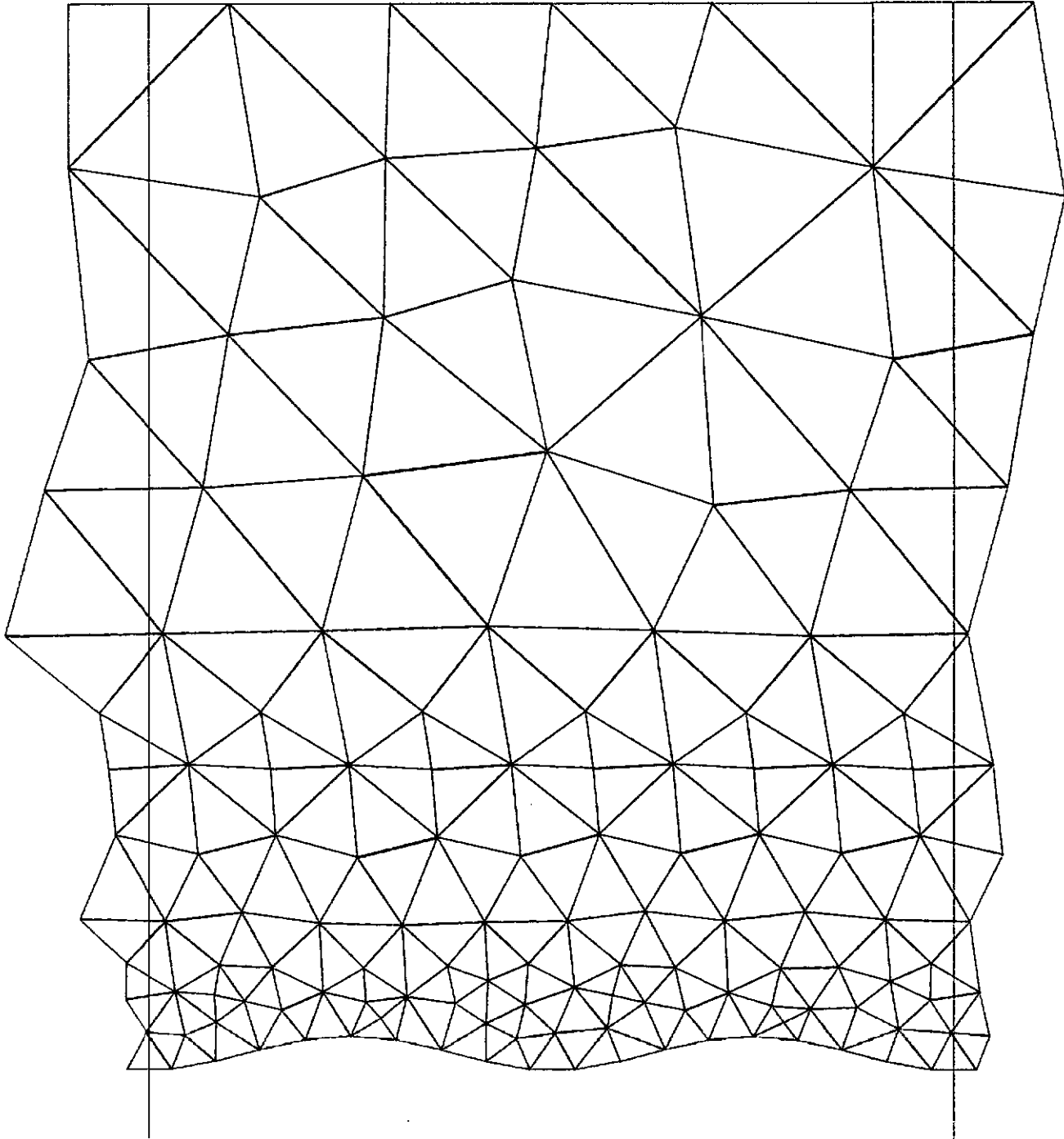
*** TOTAL DE ELEMENTOS GERADOS= 1535

*** TUBO PRINCIPAL.....= 906

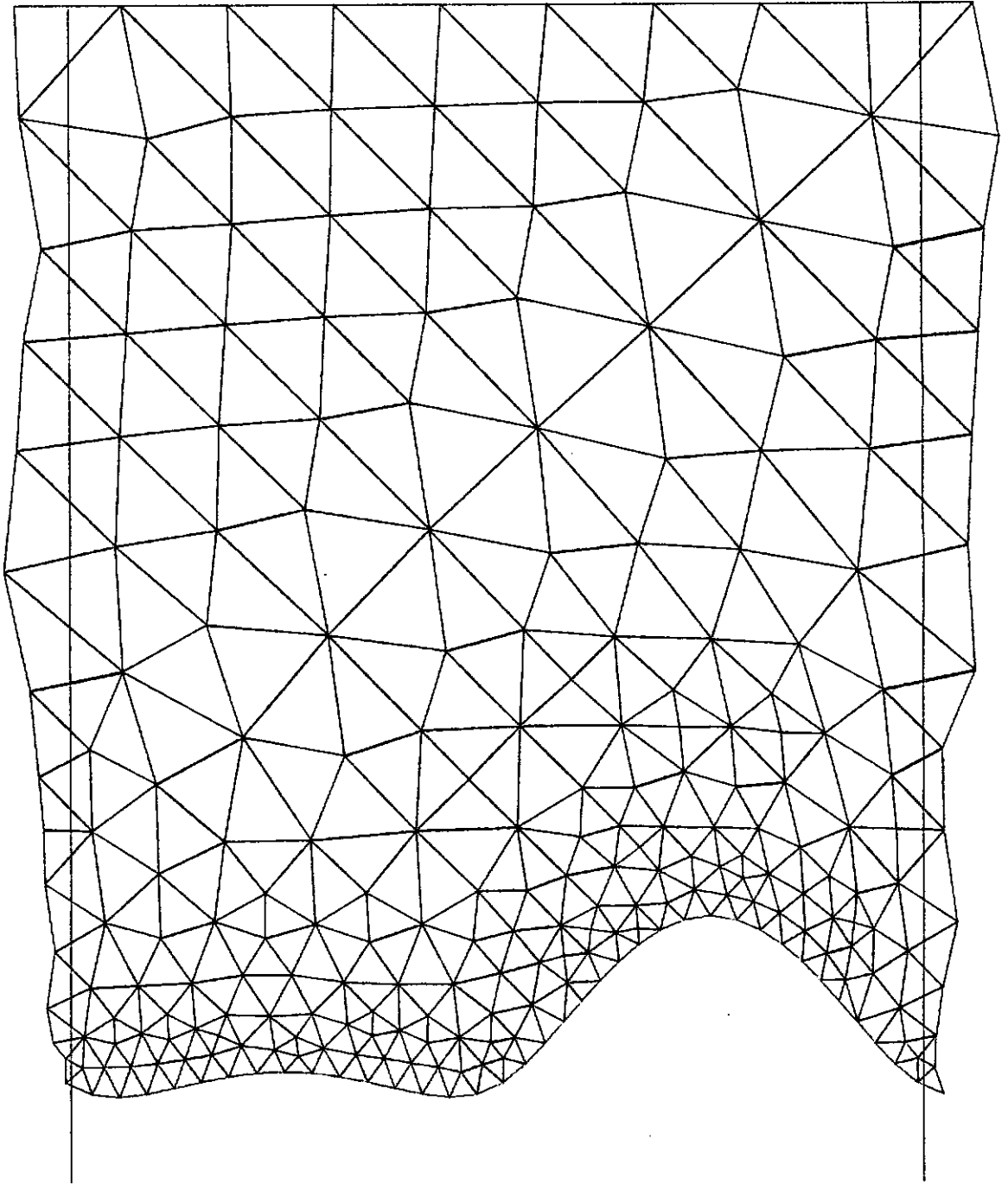
*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1....= 213
 2....= 416



TUBO PRINCIPAL



TUBO SECUNDARIO NUM. 1



TUBO SECUNDARIO NUM. 2

*
* * GEMAT * *
*
* GERAÇÃO AUTOMÁTICA *
* DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS *
* EM JUNTAS TUBULARES *
*

*
*
* PLATAFORMA PCR-1 JUNTA 30-B2 *
*
*

```

*****
*                                     *
*   DADOS DE ENTRADA               *
*                                     *
*****

```

*** TUBO PRINCIPAL

DIAMETRO...= 952.5000
 COMPRIMENTO= 3000.0000

*** INTERSECAO NUMERO 1

DIAMETRO...= 546.0999
 COMPRIMENTO= 1735.0000
 ANGULO.....= 139.3275
 COORD. X...= 1904.0000
 COORD. ANG.= 270.0000

*** INTERSECAO NUMERO 2

DIAMETRO...= 546.0999
 COMPRIMENTO= 1145.0000
 ANGULO.....= 90.0000
 COORD. X...= 1987.0000
 COORD. ANG.= 90.0000

*** INTERSECAO NUMERO 3

DIAMETRO...= 546.0999
 COMPRIMENTO= 1145.0000
 ANGULO.....= 90.0000
 COORD. X...= 1987.0000
 COORD. ANG.= 270.0000

*** INTERSECAO NUMERO 4

DIAMETRO...= 495.2998
 COMPRIMENTO= 1442.0000
 ANGULO.....= 125.6817
 COORD. X...= 1738.0000
 COORD. ANG.= 130.0000

*** INTERSECAO NUMERO 5

DIAMETRO...= 641.3499
 COMPRIMENTO= 1290.0000
 ANGULO.....= 82.8750
 COORD. X...= 1987.0000
 COORD. ANG.= 180.0000

*** DISTANCIA ENTRE PONTOS DE INTERSECAO

VALOR FORNECIDO....= 45.0000
 VALOR MEDIO ADOTADO= 44.0615

*** DISTANCIAS PARA OS NIVEIS
 LIMITES INFERIORES

NUM. DO NIVEL P/ UM PONTO P/ DOIS PONTOS

| | | |
|---|----------|----------|
| 1 | 540.0000 | 350.0000 |
| 2 | 200.0000 | 110.0000 |
| 3 | 0.0 | 0.0 |

*** REGULARIZACAO DA MALHA
NUM. DE REGULARIZACOES=3

*** PLOTAGEM DA MALHA - OPCAO= 1000

PLOTAGEM REDUZIDA SOLICITADA

PLOTAGEM NORMAL NAO SOLICITADA

```

*****
*
*          TUBO PRINCIPAL
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 176.4706 | 176.0216 |
| 2 | 88.2353 | 88.0108 |
| 3 | 44.1176 | 44.0054 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.31554 | 0.71763 | 2027 |
| 1 | 0.21917 | 0.55909 | 2844 |
| 2 | 0.20874 | 0.52501 | 2397 |
| 3 | 0.20516 | 0.52550 | 675 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 1
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 171.5623 | 171.5623 |
| 2 | 85.7912 | 85.7312 |
| 3 | 42.8906 | 42.8906 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.31487 | 0.55833 | 3397 |
| 1 | 0.23340 | 0.59746 | 3460 |
| 2 | 0.22838 | 0.59217 | 3460 |
| 3 | 0.22675 | 0.59201 | 3460 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 2
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 171.5623 | 171.5623 |
| 2 | 85.7812 | 85.7812 |
| 3 | 42.8906 | 42.8906 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULAPIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.32367 | 0.63728 | 4375 |
| 1 | 0.24706 | 0.52405 | 4233 |
| 2 | 0.24055 | 0.50561 | 4002 |
| 3 | 0.23852 | 0.50327 | 4002 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 3
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 171.5623 | 171.5623 |
| 2 | 85.7812 | 85.7812 |
| 3 | 42.8906 | 42.8906 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.32367 | 0.63728 | 4311 |
| 1 | 0.24706 | 0.52405 | 4669 |
| 2 | 0.24055 | 0.50561 | 4438 |
| 3 | 0.23852 | 0.50327 | 4438 |


```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 4
*
*****

```

*** DIMENSÃO DOS LADOS DOS RETÂNGULOS

| NUM. DO NÍVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 172.8922 | 172.8922 |
| 2 | 86.4461 | 86.4461 |
| 3 | 43.2231 | 43.2231 |

*** PARÂMETROS RELATIVOS À QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELAÇÃO A UM TRIÂNGULO EQUILÁTERO

| NUM. REGULARIZAÇÃO | DESVIO MÉDIO | DESVIO MÁX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.31572 | 0.55833 | 4873 |
| 1 | 0.24779 | 0.53409 | 4906 |
| 2 | 0.23851 | 0.55112 | 4906 |
| 3 | 0.23556 | 0.56035 | 4906 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 5
*
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 183.1691 | 183.1691 |
| 2 | 91.5845 | 91.5845 |
| 3 | 45.7923 | 45.7923 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.30742 | 0.55833 | 5422 |
| 1 | 0.23239 | 0.52358 | 5610 |
| 2 | 0.22538 | 0.48793 | 5315 |
| 3 | 0.22332 | 0.48402 | 5315 |

```

*****
*                                     *
*   RESUMO GLOBAL   *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   PONTOS GERADOS   *
*                                     *
*****

```

*** TOTAL DE PONTOS GERADOS= 2808

*** TUBO PRINCIPAL
 PONTOS DE INTERSECAO= 212
 OUTROS PONTOS.....= 1499
 TOTAL DE PONTOS.....= 1711

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1
 PONTOS DE INTERSECAO= 50
 OUTROS PONTOS.....= 269
 TOTAL DE PONTOS.....= 319

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 2
 PONTOS DE INTERSECAO= 38
 OUTROS PONTOS.....= 204
 TOTAL DE PONTOS.....= 242

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 3
 PONTOS DE INTERSECAO= 38
 OUTROS PONTOS.....= 204
 TOTAL DE PONTOS.....= 242

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 4
 PONTOS DE INTERSECAO= 40
 OUTROS PONTOS.....= 198
 TOTAL DE PONTOS.....= 238

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 5
 PONTOS DE INTERSECAO= 46
 OUTROS PONTOS.....= 222
 TOTAL DE PONTOS.....= 268

```

*****
*                                     *
*   ELEMENTOS GERADOS   *
*                                     *
*****

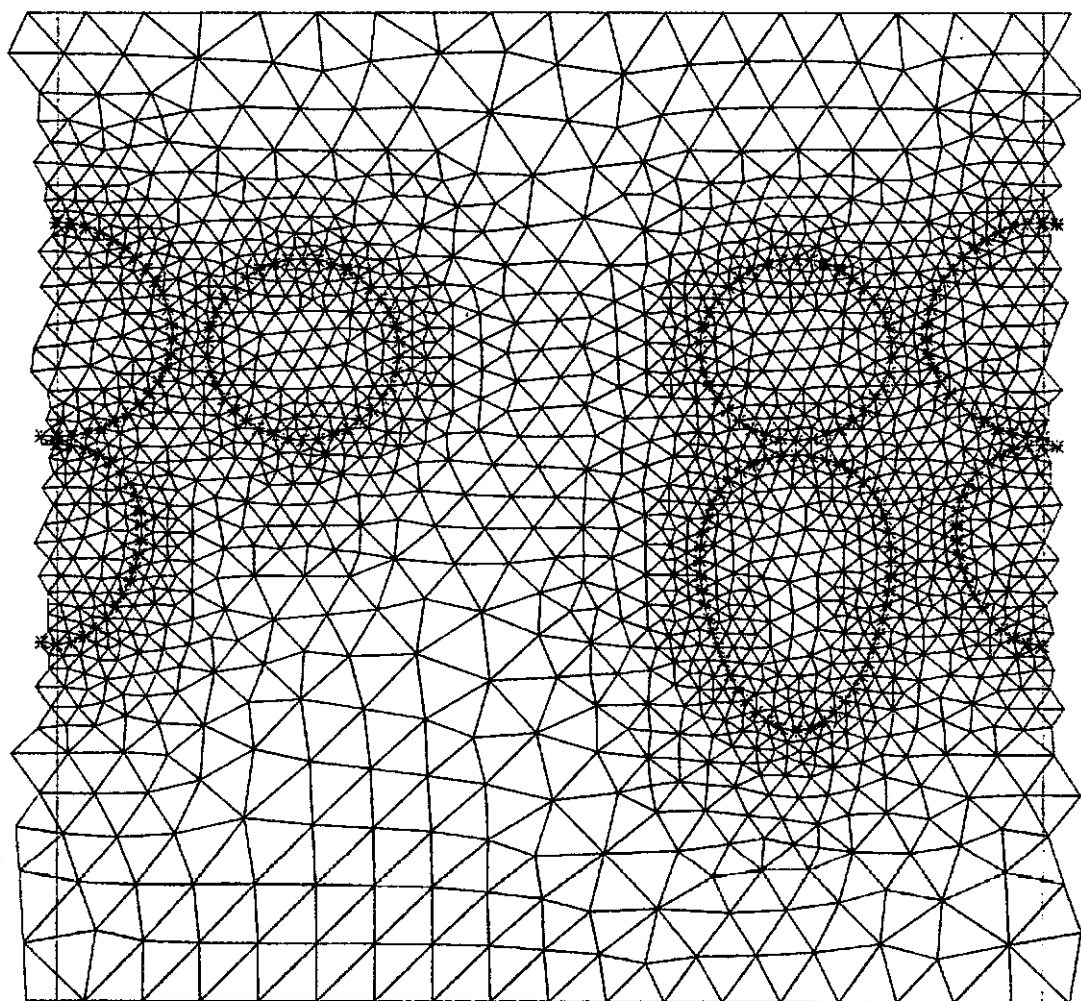
```

*** TOTAL DE ELEMENTOS GERADOS= 5744

*** TUBO PRINCIPAL.....= 3388

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1.....= 578

2.....= 436
3.....= 436
4.....= 427
5.....= 479



TUBO PRINCIPAL

CAPÍTULO V

ANÁLISE DE MALHAS OBTIDAS COM O GERADOR AUTOMÁTICO

O procedimento desenvolvido para a geração automática de malhas de elementos finitos apresenta, como já visto, características de procedimentos de geração do tipo aleatório. Assim, não se sabe previamente quantos pontos ou elementos serão gerados para uma malha, nem seu aspecto quanto ao refinamento e à gradação. Estas características são determinadas pelos parâmetros de afastamento entre pontos de interseção, número de níveis e tabela de distâncias. São, contudo, parâmetros indiretos, não sendo possível fixar perfeitamente o resultado final desejado para uma malha.

Objetivando verificar o comportamento do procedimento de geração automática frente a variações nos parâmetros de entrada que afetam as características das malhas obtidas, foram realizados testes comparativos, analisando a influência dos parâmetros nas malhas de uma dada junta.

Os testes foram realizados considerando-se a mesma junta tubular do exemplo um do capítulo IV, apresentada na figura IV.2. A malha obtida será também utilizada para as análises comparativas. A junta é simples, do tipo "Y" e, portanto, com apenas um tubo secundário.

Os dados básicos de entrada para o exemplo um do capí-

tulo IV foram:

- distância entre pontos de interseção: 100 mm
- número de níveis: 2
- número de regularizações: 3
- tabela de distâncias (em mm):

| <u>nível</u> | <u>para 1 ponto</u> | <u>para 2 pontos</u> |
|--------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 450 | 230 |
| 2 | 0 | 0 |

Os resultados obtidos para a malha da junta foram:

- número de pontos de interseção: 22
- número total de pontos: 320
- número total de elementos: 636
- desvio médio para o tubo principal: 0,210
- desvio médio para o tubo secundário: 0,244

O tempo de "CPU" consumido para a execução foi de 35 segundos.

As malhas obtidas foram apresentadas nas plotagens respectivas, incluídas no capítulo IV.

O primeiro caso gerado para comparação consistiu em se obter uma malha mais refinada para a junta e uma gradação interna mais suave. Para tanto, reduziu-se a distância entre pontos de interseção, aumentou-se o número de níveis e alterou-se

a tabela de distâncias, introduzindo-se limites intermediários.

Os dados básicos de entrada para o programa "GEMAT" foram:

- distância entre pontos de interseção: 40 mm
- número de níveis: 3
- número de regularizações: 3
- tabela de distâncias (em mm):

| <u>nível</u> | <u>para 1 ponto</u> | <u>para 2 pontos</u> |
|--------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 460 | 300 |
| 2 | 170 | 90 |
| 3 | 0 | 0 |

Os resultados obtidos foram:

- número de pontos de interseção: 54
- número total de pontos: 874
- número de elementos: 1770
- desvio médio para o tubo principal: 0,218
- desvio médio para o tubo secundário: 0,236

O tempo de "CPU" consumido foi de 215 segundos. Uma listagem parcial e as plotagens reduzidas das malhas são apresentadas no final do capítulo, permitindo comparações com as malhas anteriores, comprovando visualmente, além dos resultados numéricos, o maior refinamento obtido.

Quanto à qualidade dos elementos gerados, o número de regularizações não foi alterado, e praticamente não houve modificações dos resultados relativos aos desvios médios.

Verifica-se que o tempo de "CPU" cresceu sensivelmente, bem mais que um aumento proporcional ao número de pontos ou de elementos.

No segundo caso de comparação procurou-se ilustrar o efeito do procedimento de regularização sobre a qualidade da malha. A ilustração refere-se ao aspecto visual da malha, uma vez que em termos numéricos têm-se sempre na saída impressa os valores de qualidade da malha, sem regularização e após cada regularização realizada.

Os dados de entrada foram exatamente os mesmos do caso anterior, apenas não sendo solicitada qualquer regularização.

Os resultados de interesse para a análise foram:

- desvio médio para o tubo principal: 0,314
- desvio médio para o tubo secundário: 0,324

O tempo de "CPU" consumido foi de 181 segundos.

As correspondentes listagens parciais e plotagens reduzidas são também incluídas no final do capítulo.

Comparando-se com o caso anterior, onde foram realizadas

três regularizações, verifica-se que houve um aumento médio de cerca de 40% em relação aos parâmetros de qualidade final da malha. Visualmente comprova-se que a malha perdeu em qualidade. Pode-se identificar também a presença de linhas e direções preferenciais ao longo dos elementos, originárias do esquema utilizado pelo procedimento para posicionar os pontos. O aspecto global da malha não tem a mesma homogeneidade obtida com a regularização.

Também em relação ao caso anterior, houve uma redução do tempo de "CPU" consumido. O tempo anterior foi maior em cerca de 20%. Como a única diferença dos dados de entrada é a solicitação de regularização, tem-se que este procedimento é responsável pelo acrêscimo de tempo.

Apesar do razoável aumento de tempo, a regularização introduz uma melhora sensível na qualidade da malha, comprova da numérica e visualmente.

O terceiro caso para comparação corresponde a uma geração praticamente sem gradação interna.

Os dados básicos de entrada são apresentados a seguir:

- distância entre pontos de interseção: 100 mm
- número de regularizações: 3
- número de níveis: 1
- tabela de distâncias (em mm):

| <u>nível</u> | <u>para 1 ponto</u> | <u>para 2 pontos</u> |
|--------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 0 | 0 |

Os resultados obtidos foram:

- número de pontos de interseção: 20
- número total de pontos: 617
- número total de elementos: 1204
- desvio médio para o tubo principal: 0,274
- desvio médio para o tubo secundário: 0,305

O tempo de "CPU" consumido foi de 54 segundos.

A correspondente listagem parcial e as plotagens reduzidas são também incluídas no final do capítulo.

Em relação à primeira malha analisada, os parâmetros de desvio indicam que a malha obtida foi de qualidade um pouco inferior, não sendo, entretanto, uma redução importante.

Objetivando verificar o comportamento do tempo consumido de "CPU" em função da malha gerada, procurou-se estabelecer uma curva, considerando-se os valores obtidos nos testes realizados. Esta curva é apresentada na figura V.1, devendo ser considerada apenas como ilustrativa. Comprova-se pela curva que o aumento de tempo é substancial quando cresce o número de pontos ou de elementos, devido provavelmente aos testes e operações em etapas iterativas do processamento, onde para cada ponto ou elemento adicional da malha devem-se percorrer todos os demais. Observa-se também através da curva a existência de um consumo mínimo de tempo, independente do número de elementos das malhas.

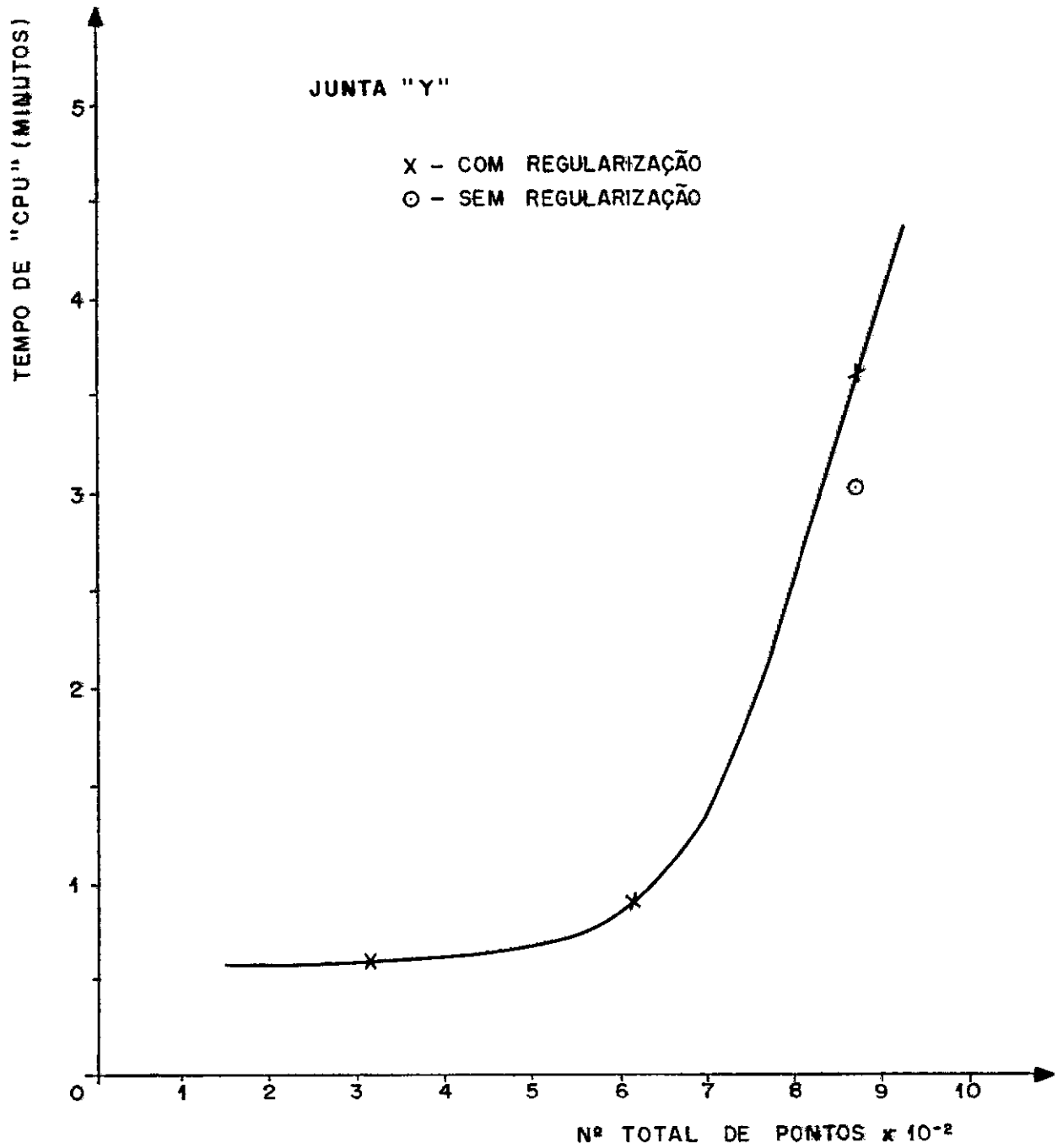


FIG. V. 1 - CONSUMO DE TEMPO DE "CPU"

São apresentadas a seguir as listagens parciais e as plotagens reduzidas das malhas analisadas.

LISTAGENS E PLOTAGENS DOS CASOS ANALISADOS

```

*****
*                                     *
*               * GEMAT *           *
*                                     *
*           GERACAO AUTOMATICA       *
* DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS *
*           EM JUNTAS TUBULARES     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*                                     *
* CASO UM - JUNTA Y - DISPI=40 MM  3 NIVEIS  3 REGUL.
*                                     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   DADOS DE ENTRADA   *
*                                     *
*****

```

*** TUBO PRINCIPAL

DIAMETRO...= 542.9248
 COMPRIMENTO= 1700.0000

*** INTERSECAO NUMERO 1

DIAMETRO...= 495.2998
 COMPRIMENTO= 2184.0000
 ANGULO.....= 45.0000
 COORD. X...= 580.0000
 COORD. ANG.= 90.0000

*** DISTANCIA ENTRE PONTOS DE INTERSECAO

VALOR FORNECIDO.....= 40.0000
 VALOR MEDIO ADOTADO= 38.7005

*** DISTANCIAS PARA OS NIVEIS
 LIMITES INFERIORES

| NUM. DO NIVEL | P/ UM PONTO | P/ DOIS PONTOS |
|---------------|-------------|----------------|
| 1 | 460.0000 | 300.0000 |
| 2 | 170.0000 | 90.0000 |
| 3 | 0.0 | 0.0 |

*** REGULARIZACAO DA MALHA
 NUM. DE REGULARIZACOES=3

*** PLOTAGEM DA MALHA - OPCAO=1000
 IDENTIFICACAO DO ARQUIVO = 15

PLOTAGEM REDUZIDA SOLICITADA

PLOTAGEM NORMAL NAO SOLICITADA

*** ARQUIVO DE SAIDA DA MALHA= 0
 SAIDA NAO SOLICITADA


```

*****
*                                     *
*           TUBO PRINCIPAL           *
*                                     *
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 154.5454 | 155.0590 |
| 2 | 77.2727 | 77.5295 |
| 3 | 38.6364 | 38.7647 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.31434 | 0.55739 | 725 |
| 1 | 0.22577 | 0.56695 | 734 |
| 2 | 0.22001 | 0.53181 | 989 |
| 3 | 0.21831 | 0.52026 | 989 |

```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 1
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 155.6030 | 155.6030 |
| 2 | 77.8015 | 77.8015 |
| 3 | 38.9008 | 38.9008 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.32366 | 0.55833 | 1493 |
| 1 | 0.24371 | 0.51392 | 1417 |
| 2 | 0.23822 | 0.53753 | 1282 |
| 3 | 0.23625 | 0.52982 | 1282 |

```

*****
*                                     *
*   RESUMO GLOBAL   *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
* PONTOS GERADOS *
*                                     *
*****

```

*** TOTAL DE PONTOS GERADOS= 374

```

*** TUBO PRINCIPAL
PONTOS DE INTERSECAO= 54
OUTROS PONTOS.....= 506
TOTAL DE PONTOS.....= 560

```

```

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1
PONTOS DE INTERSECAO= 54
OUTROS PONTOS.....= 314
TOTAL DE PONTOS.....= 368

```

```

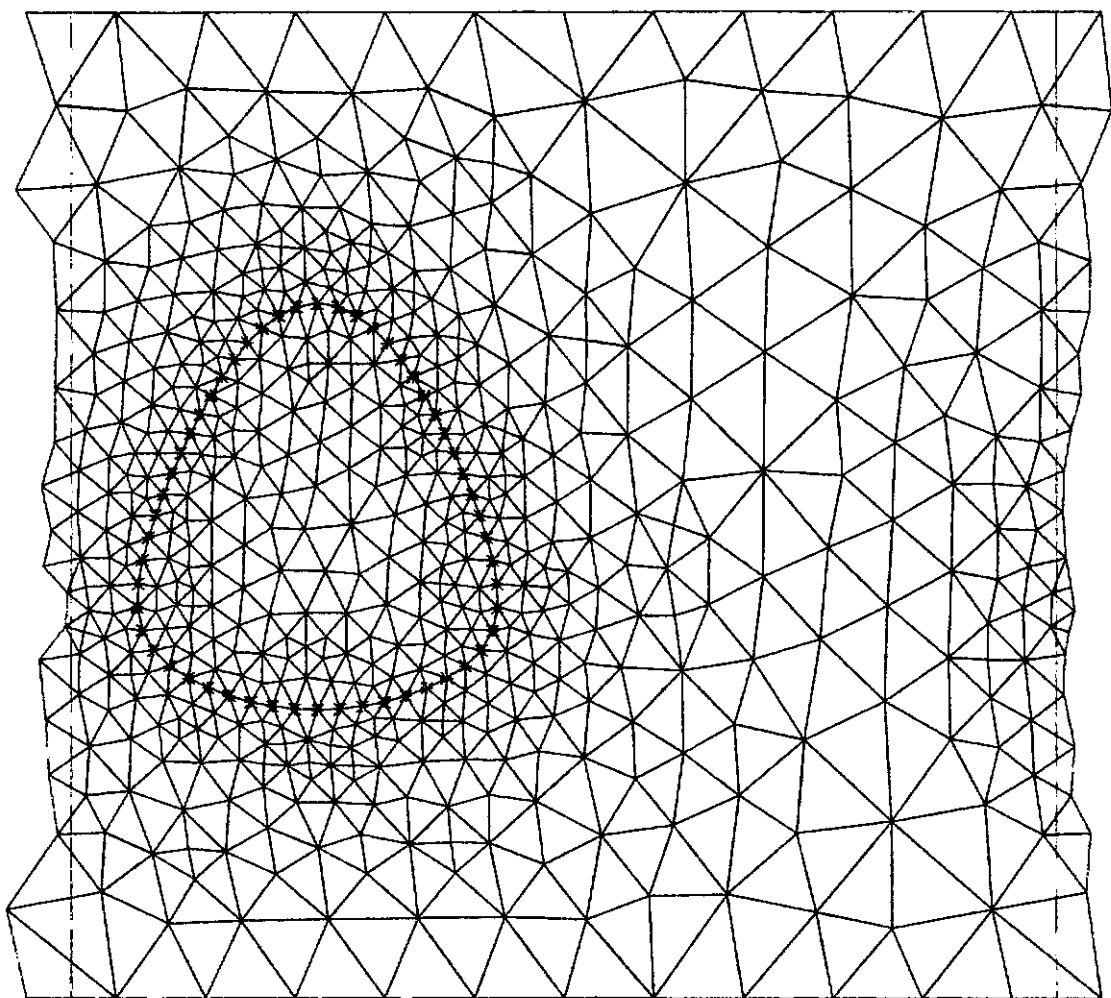
*****
*                                     *
* ELEMENTOS GERADOS *
*                                     *
*****

```

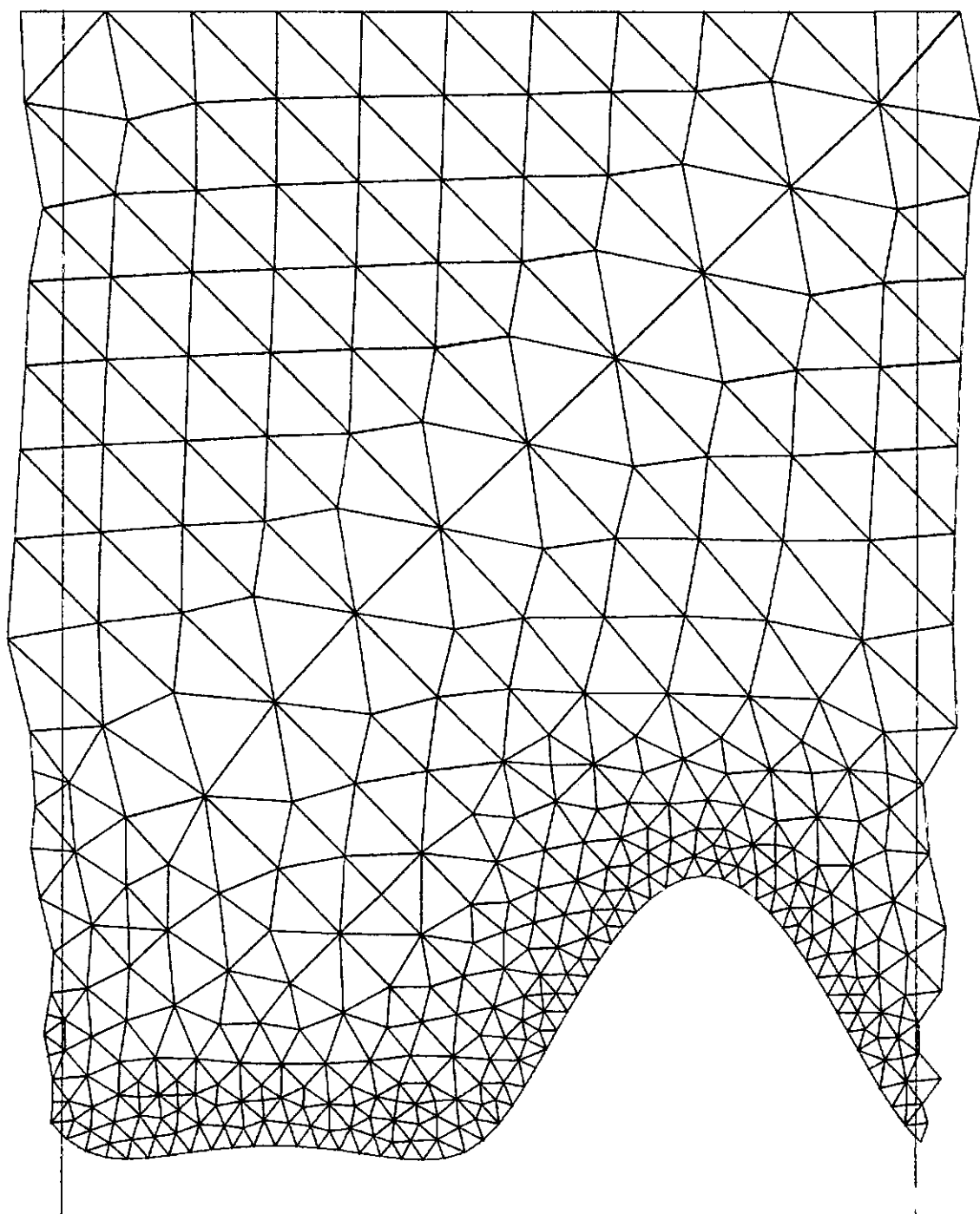
*** TOTAL DE ELEMENTOS GERADOS= 1770

*** TUBO PRINCIPAL.....= 1098

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1.....= 672



TUBO PRINCIPAL



```

*****
*                                     *
*               * GEMAT *           *
*                                     *
*           GERACAO AUTOMATICA       *
* * DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS *
*           EM JUNTAS TUBULARES     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*                                     *
* CASO DOIS - JUNTA Y - DISPI=40 MM 3 NIVEIS SEM REGUL.
*                                     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*
*  DADOS DE ENTRADA  *
*
*****

```

*** TUBO PRINCIPAL

DIAMETRO...= 542.9248
 COMPRIMENTO= 1700.0000

*** INTERSECAO NUMERO 1

DIAMETRO...= 495.2998
 COMPRIMENTO= 2184.0000
 ANGULO.....= 45.0000
 COORD. X...= 580.0000
 COORD. ANG.= 90.0000

*** DISTANCIA ENTRE PONTOS DE INTERSECAO

VALOR FORNECIDO.....= 40.0000
 VALOR MEDIO ADOTADO= 38.7005

*** DISTANCIAS PARA OS NIVEIS
 LIMITES INFERIORES

| NUM. DO NIVEL | P/ UM PONTO | P/ DOIS PONTOS |
|---------------|-------------|----------------|
| 1 | 460.0000 | 300.0000 |
| 2 | 170.0000 | 90.0000 |
| 3 | 0.0 | 0.0 |

*** REGULARIZACAO DA MALHA
 NUM. DE REGULARIZACOES=0

*** PLOTAGEM DA MALHA - OPCAO=1000
 IDENTIFICACAO DO ARQUIVO = 15

PLOTAGEM REDUZIDA SOLICITADA

PLOTAGEM NORMAL NAO SOLICITADA

*** ARQUIVO DE SAIDA DA MALHA= 0
 SAIDA NAO SOLICITADA

```

*****
*
*          TUBO PRINCIPAL          *
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 154.5454 | 155.0590 |
| 2 | 77.2727 | 77.5295 |
| 3 | 38.6364 | 38.7647 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.31434 | 0.55739 | 725 |


```

*****
*
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 1
*
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 155.6030 | 155.6030 |
| 2 | 77.8015 | 77.8015 |
| 3 | 38.9008 | 38.9008 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.32366 | 0.55833 | 1493 |

```

*****
*                                     *
*   RESUMO GLOBAL   *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   PONTOS GERADOS   *
*                                     *
*****

```

*** TOTAL DE PONTOS GERADOS= 874

```

*** TUBO PRINCIPAL
PONTOS DE INTERSECAO= 54
OUTROS PONTOS.....= 506
TOTAL DE PONTOS.....= 560

```

```

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1
PONTOS DE INTERSECAO= 54
OUTROS PONTOS.....= 314
TOTAL DE PONTOS.....= 368

```

```

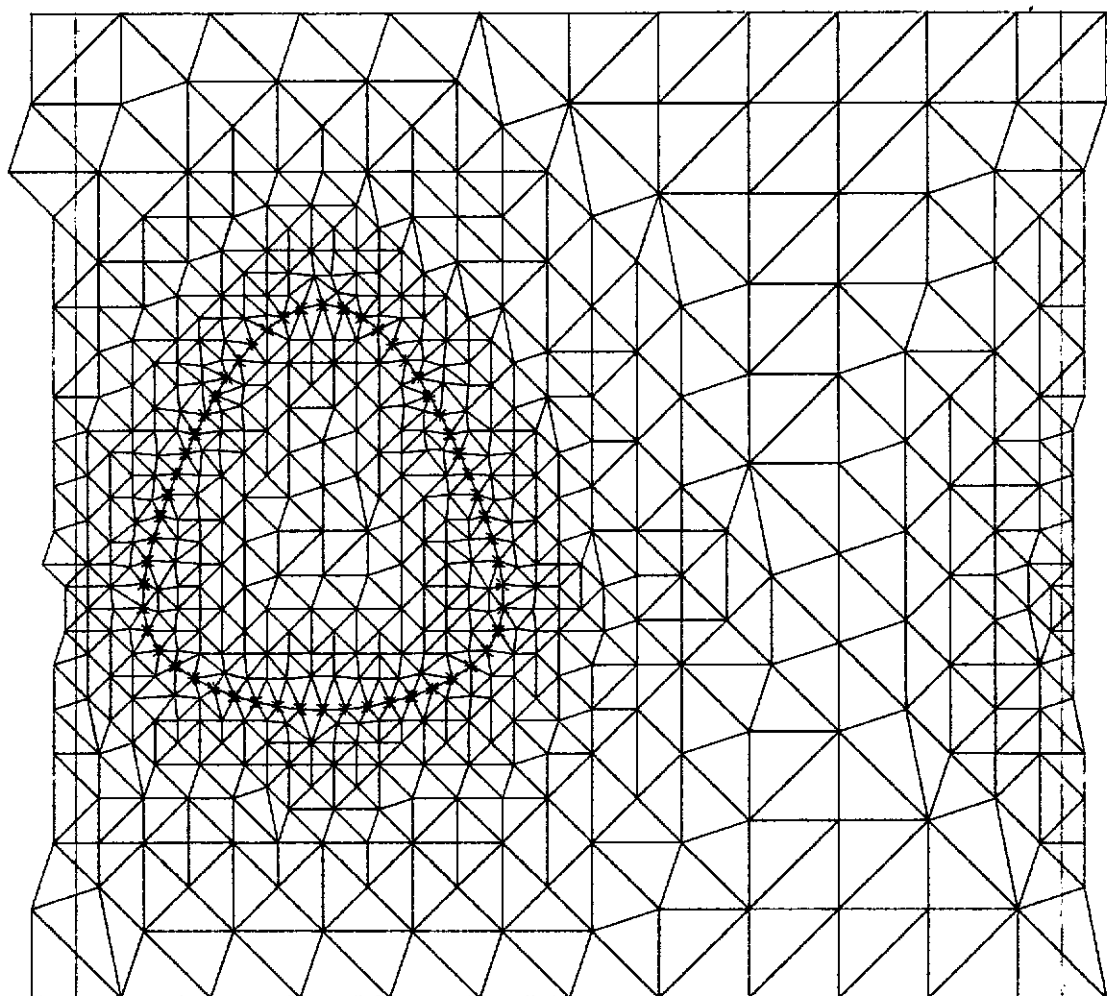
*****
*                                     *
*   ELEMENTOS GERADOS *
*                                     *
*****

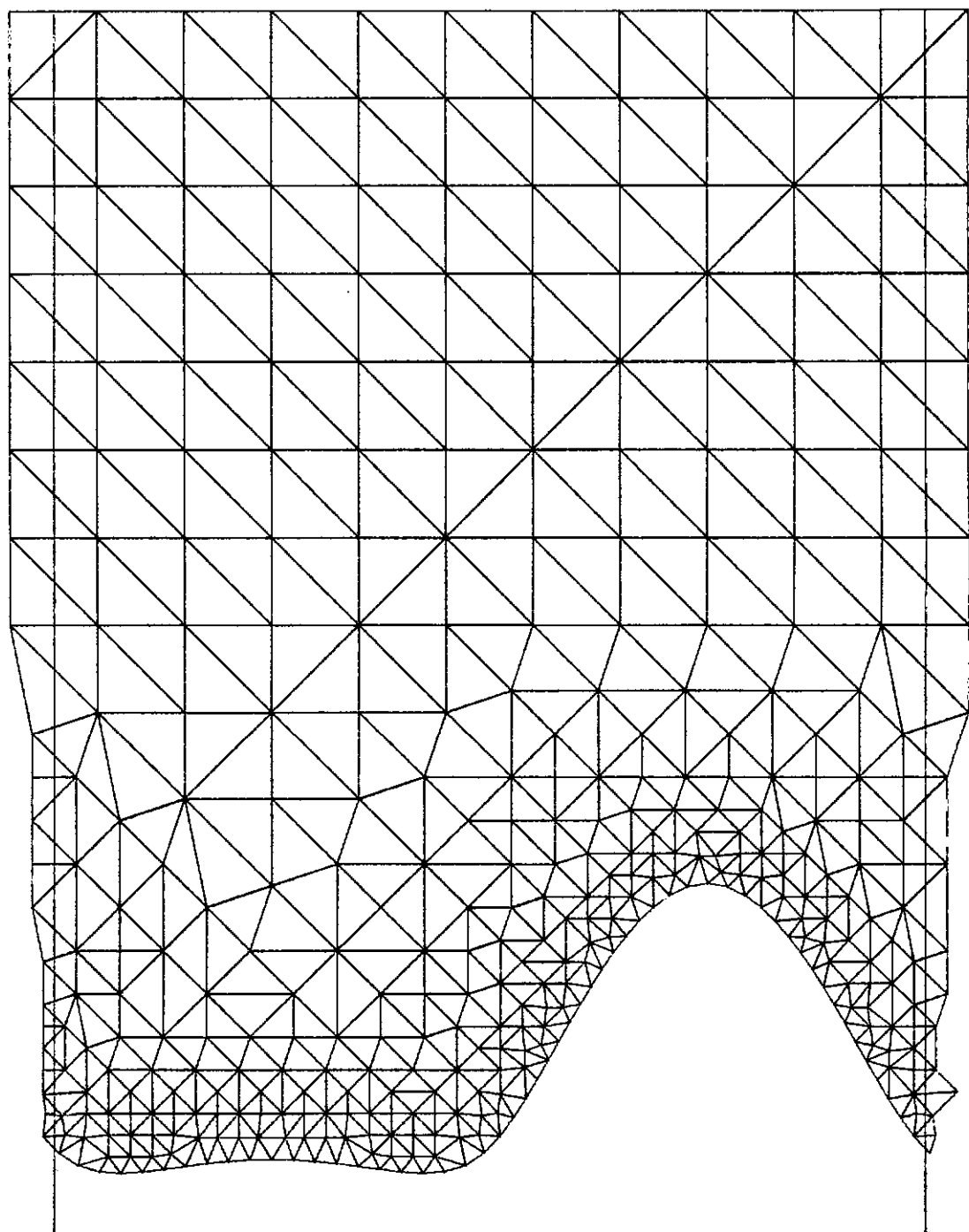
```

*** TOTAL DE ELEMENTOS GERADOS= 1774

*** TUBO PRINCIPAL.....= 1098

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1.....= 672





```

*****
*                                     *
*               * GEMAT *           *
*                                     *
*           GERACAO AUTOMATICA       *
* DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS *
*           EM JUNTAS TUBULARES     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*                                     *
* CASO TRES - JUNTA Y - DISPI=100 MM 1 NIVEL 3 REGUL. *
*                                     *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   DADOS DE ENTRADA               *
*                                     *
*****

```

*** TUBO PRINCIPAL

DIAMETRO...= 542.9248
 COMPRIMENTO= 1700.0000

*** INTERSECAO NUMERO 1

DIAMETRO...= 495.2998
 COMPRIMENTO= 2184.0000
 ANGULO.....= 45.0000
 COORD. X...= 530.0000
 COORD. ANG.= 90.0000

*** DISTANCIA ENTRE PONTOS DE INTERSECAO

VALOR FORNECIDO.....= 100.0000
 VALOR MEDIO ADOTADO= 100.1661

*** DISTANCIAS PARA OS NIVEIS
 LIMITES INFERIORES

| NUM. DO NIVEL | P/ UM PONTO | P/ DOIS PONTOS |
|---------------|-------------|----------------|
| 1 | 0.0 | 0.0 |

*** REGULARIZACAO DA MALHA
 NUM. DE REGULARIZACOES=3

*** PLOTAGEM DA MALHA - OPCAO=1000
 IDENTIFICACAO DO ARQUIVO = 15

PLOTAGEM REDUZIDA SOLICITADA

PLOTAGEM NORMAL NAO SOLICITADA

*** ARQUIVO DE SAIDA DA MALHA= 0
 SAIDA NAO SOLICITADA

```

*****
*                                     *
*           TUBO PRINCIPAL           *
*                                     *
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|----------|----------|
| 1 | 100.0000 | 100.3323 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.34195 | 0.50712 | 303 |
| 1 | 0.28666 | 0.49131 | 218 |
| 2 | 0.27711 | 0.46429 | 237 |
| 3 | 0.27380 | 0.48517 | 237 |

```

*****
*                                     *
*      TUBO SECUNDARIO NUM. 1      *
*                                     *
*****

```

*** DIMENSAO DOS LADOS DOS RETANGULOS

| NUM. DO NIVEL | LADO X | LADO Y |
|---------------|---------|---------|
| 1 | 97.2519 | 97.2519 |

*** PARAMETROS RELATIVOS A QUALIDADE DA MALHA
DESVIO EM RELACAO A UM TRIANGULO EQUILATERO

| NUM. REGULARIZACAO | DESVIO MEDIO | DESVIO MAX. | PIOR ELEMENTO |
|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 0.35616 | 0.66529 | 1130 |
| 1 | 0.31430 | 0.63044 | 1129 |
| 2 | 0.30828 | 0.64569 | 1129 |
| 3 | 0.30488 | 0.65482 | 1129 |


```

*****
*                                     *
*   RESUMO GLOBAL                   *
*                                     *
*****

```

```

*****
*                                     *
*   PONTOS GERADOS                 *
*                                     *
*****

```

*** TOTAL DE PONTOS GERADOS= 617

```

*** TUBO PRINCIPAL
PONTOS DE INTERSECAO= 20
OUTROS PONTOS.....= 286
TOTAL DE PONTOS.....= 306

```

```

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1
PONTOS DE INTERSECAO= 20
OUTROS PONTOS.....= 311
TOTAL DE PONTOS.....= 331

```

```

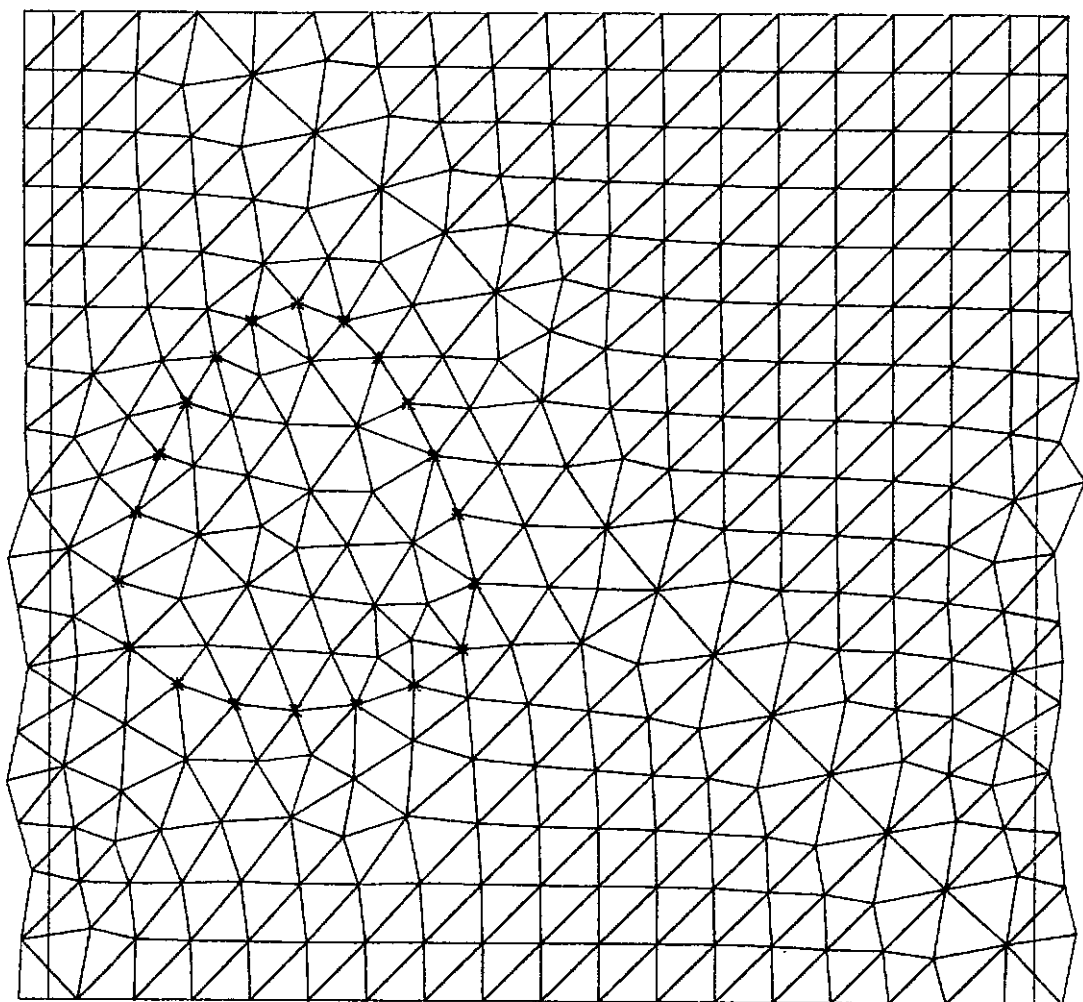
*****
*                                     *
*   ELEMENTOS GERADOS             *
*                                     *
*****

```

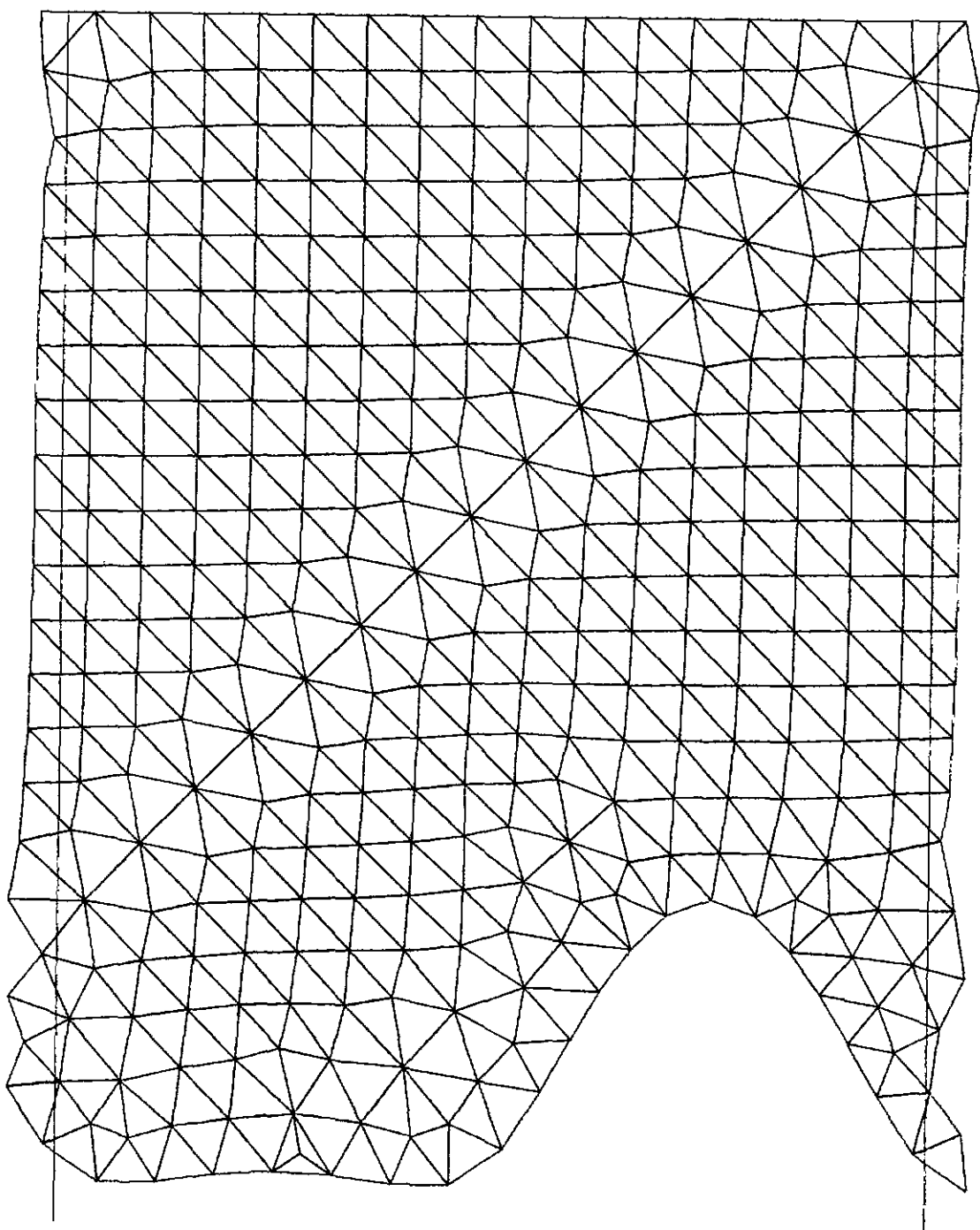
*** TOTAL DE ELEMENTOS GERADOS= 1204

*** TUBO PRINCIPAL.....= 578

*** TUBO SECUNDARIO NUM. 1....= 626



TUBO PRINCIPAL



CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um procedimento de concepção original, de base exclusivamente geométrica, para a geração automática de malhas de elementos finitos, especializado para juntas tubulares.

Tal procedimento é bastante superior aos esquemas conhecidos de literatura, sendo adequado inclusive para juntas com tubos secundário de eixos não co-planares. As configurações são genéricas, não se limitando a tipos-padrão de juntas planas. Não são introduzidas limitações geométricas de ângulos e espaçamentos.

O procedimento foi programado em computador, correspondendo ao programa denominado "GEMAT".

A programação é adequada para a geração de malhas de elementos finitos triangulares planos, possibilitando ao usuário especificar as características desejadas para a malha, tais como a gradação e o refinamento. Os vários exemplos apresentados demonstram a capacidade e a flexibilidade do programa.

Sua utilização permite a análise das tensões localizadas atuantes nas juntas tubulares de plataformas através de malhas de elementos finitos obtidas com rapidez e confiança. Em princípio esta análise de tensões seria realizada em juntas de maior importância ou mais críticas, definidas através de métodos mais simples, tais como fórmulas paramétricas de concentração de tensões. Juntas com resistência à fadiga mais reduzida seriam também objeto de análise de tensões, permitindo uma avaliação mais criteriosa.

A programação é totalmente orientada para a geração de malhas em juntas tubulares, requerendo uma quantidade de dados de entrada bastante reduzida, com um tempo mínimo para sua preparação e codificação.

É gerado um arquivo com os dados da malha, objetivando a análise posterior das tensões através de algum sistema de cálculo estrutural. São produzidas plotagens das malhas geradas, permitindo visualização e avaliação da malha e interpretação dos resultados do cálculo das tensões. Os resultados da malha são também impressos, sendo incluídos parâmetros que permitem uma avaliação qualitativa.

Evitam-se todos os inconvenientes de uma geração não-automatizada, trabalho extremamente árduo, demorado e com grande possibilidade de erros, tendo em vista a relativa complexidade

de estudos de convergência, análises alternativas e otimiza
ção do projeto das juntas.

Por outro lado, o usuário deve policiar-se para que a extrema facilidade obtida para a geração de malhas com grande número de pontos e de elementos não seja dissociada do eleva
do esforço computacional necessário para a posterior análise das tensões, com o correspondente custo de máquina, além do tempo de pessoal para interpretar a imensa massa de resulta
dos que pode ser produzida. Mesmo o próprio programa de gera
ção pode consumir elevado tempo de computador, caso sejam es
pecificadas malhas extremamente refinadas. É um cuidado a se tomar com todos os programas de geração automática. Devem ser utilizados com critério, considerando-se o problema global e não se afastando de limites realistas.

O tempo de "CPU" utilizado pelo programa "GEMAT" para a geração automática da malha em juntas tubulares realmente não é desprezível, podendo atingir valores elevados para juntas compostas por vários tubos ou com malhas muito refinadas. Não é uma deficiência da programação, mas sim uma característi
ca dos procedimentos de geração do tipo aleatório, sendo necessariamente grande o número de operações e testes a realizar.

Com relação à eficiência da programação desenvolvida, é comum tentar-se estabelecer um parâmetro para avaliação quali
tativa dos programas de geração automática, correlacionando o número de dados de entrada ou, mais precisamente, de cartões
necessários para a completa especificação do problema com o

número de dados gerados automaticamente. Com esta consideração o programa "GEMAT" atinge n^{íveis} de eficiência bastante elevados.

A equação VI.1 a seguir determina "EG", eficiência percentual de geração, sendo "E" o número de cartões de entrada e "S" o número de dados gerados.

$$EG = 100 \cdot (1 - E/S) \quad (\text{eq. VI.1})$$

Como ilustração, o terceiro exemplo apresentado na seção IV.4 necessitou de 13 cartões de entrada, tendo sido gerados 2808 pontos e 5744 elementos, o que resulta em uma eficiência de 99,8%.

A programação não inclui procedimento de reordenação dos nós para uma numeração otimizada, objetivando a obtenção da matriz de rigidez com largura de banda m^{ín}ima. Considerou-se sua utilização em conjunto com as demais facilidades computacionais dispon^{íveis} na "PETROBRÁS", incluindo eficiente rotação de reordenação para redução de banda. A redução é realizada em etapa independente, de modo a preparar os dados para o programa de análise estrutural, no caso o conhecido sistema STRUDL ⁽¹⁹⁾. Inclusive estão sendo implementados diretamente neste sistema rotinas e respectivos comandos para a redução de banda, dispensando a pré-ordenação dos nós como etapa ã parte.

ção automática da malha para juntas tubulares também diretamente no sistema STRUDL ⁽¹⁹⁾. Concluída a etapa de geração da malha, o sistema interromperia o processamento, armazenando em memória auxiliar todos os dados e informações necessárias para um reinício que seria efetuado após avaliação e aprovação da malha pelo usuário.

A reordenação dos nós como etapa acoplada ou anterior ao sistema de análise estrutural é mais adequada e flexível do que quando incluída na geração da malha, tendo em vista que a reordenação depende diretamente de como será realizada a análise, em função da consideração ou não de subestruturas.

Apesar do exposto, pode-se pensar em incluir a reordenação diretamente na geração da malha, tirando proveito de aspectos específicos do processo e da aplicação. Na rotina de regularização da malha gerada são identificados os pontos vizinhos diretamente conectados a cada ponto da malha através de lados de elementos. Este conhecimento permitiria a montagem de uma estrutura tipo árvore contendo a interligação dos pontos que poderia ser utilizada em um processo de reordenação. A determinação da interligação dos pontos exige razoável esforço de processamento para malhas com elevado número de pontos quando realizada como etapa posterior à geração. A inclusão da reordenação na geração poderia ser, assim, computacionalmente mais eficiente.

Aprimoramentos podem ser incluídos na programação atual da geração automática, de modo a possibilitar a consideração

de possíveis características de simetria das juntas tubulares e a presença de reforços, tais como anéis ou chapas longitudinais. É interessante também a inclusão de opção para a entrada direta de pontos prefixados pelo usuário.

Não se objetiva, a princípio, gerar a malha também em peças de reforço, mas sim programar a geração de pontos na superfície dos tubos da junta em posições correspondentes às ligações com os reforços, permitindo sua consideração na análise das tensões. As regiões próximas aos reforços são importantes quanto à distribuição das tensões, devendo ser tratadas semelhantemente às linhas de junção dos tubos, de modo que a malha seja também mais refinada no seu entorno.

Poderiam ser considerados também os casos de juntas com tubos que apresentam mudanças de espessura na proximidade da junção com o objetivo de aumentar sua resistência. A seção transversal da transição de espessuras seria tratada para a geração da malha de modo análogo à presença de um anel de reforço, permitindo a separação e identificação dos elementos de espessura diferente.

Desenvolvimentos podem ainda ser realizados de modo a estender a aplicação do programa "GEMAT" para juntas com superposição de tubos secundários, situação algumas vezes presente nas estruturas, se bem que não recomendável.

geração de um ponto, dois pontos ou a divisão em subquadrados, independentemente para cada tubo da junta. Outra opção seria uma tabela comum, onde cada tubo corresponderia a um número específico de níveis, partindo do nível mais elevado. Qualquer das soluções permitiria uma melhor adequação do tamanho dos elementos extremos, ou seja, elementos distantes das junções, às dimensões de cada tubo. As seções transversais extremas devem ser representadas por pontos alinhados, correspondendo à geração de um ponto no centro de quadrados de nível um. A tabela comum é com mesmo número de níveis para toda a junta introduz certas restrições, principalmente quando os tubos têm diâmetros muito diferentes.

Ainda com relação à tabela de distância, pode-se introduzir também a opção da própria programação definir uma tabela interna, partindo de certas considerações estabelecidas como *default* e adequadas para as características geométricas de cada problema. O usuário solicitaria a tabela interna ou forneceria a tabela através dos dados de entrada. A programação poderia também atuar sobre a tabela fornecida pelo usuário quando ocorresse a situação de erro, com uma seção extrema não representada por pontos nos centros de quadrados de nível um. Atualmente esta ocorrência cancela o processamento. Automaticamente seriam desprezados os níveis em excesso, e a seção extrema teria todos os pontos correspondendo ao centro de quadrados do nível superior adequado. Um tubo principal não teria assim necessariamente as seções extremas com mesmo número de pontos. A alteração na consideração da tabela seria informada ao usuário na saída impressa.

Embora direcionada para juntas tubulares, a programação pode ser utilizada quase que diretamente em outras aplicações envolvendo peças tubulares, como por exemplo em bocais de vasos de pressão. As características do procedimento desenvolvido possibilitam seu emprego, através de programação adequada, em problemas de geração de malhas de elementos finitos com características de contornos irregulares e formas arbitrárias, e onde é necessária a obtenção de diferentes graus de refinamento e gradação, com diferentes regiões de concentração de pontos. Novos desenvolvimentos podem ser direcionados na elaboração de programação específica para determinadas aplicações.

Como comentário final, tem-se que o programa "GEMAT" vem sendo utilizado com sucesso na PETROBRÁS para a análise de nós de jaquetas de plataformas de produção e em estudos e pesquisas relativos a concentração de tensões em juntas. A programação está sendo empregada na determinação dos fatores de concentração de tensões em nó da estrutura da perna de plataforma de perfuração auto-elevatória (*jack-up*), atualmente em fase de projeto, sendo inclusive o primeiro projeto nacional de estruturas deste tipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) API - *Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms*, Washington, D. C., 1981 (API RP 2A).
- (2) DET NORSKE VERITAS. *Rules for the design construction and inspection of offshore structures*. Oslo, 1977.
- (3) AWS. *Structural welding code*. Miami, FA, 1976. (AWS D1.1).
- (4) LEICK, R.D. & POTVIN, A.B. Automated mesh generation for tubular joint stress analysis. *Computers & Structures*, 7: 73-91, 1977.
- (5) RODABAUGH, E.C. *Review of data relevant to the design of tubular joints for use in fixed offshore platforms*, New York, WRC, 1980. 85 p. (Welding Research Council Bulletin, 256).
- (6) CARTER, R.M.; MARSHALL, P.W.; THOMAS, P.D. & SWANSON, T. M. Materials problems in offshore platforms. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. 1. *Houston, Texas*, 1969. *Preprints of 1969 offshore technology conference*, Houston, Texas. 1969. 2v. (OTC 1043).

- (7) KUANG, J.G.; POTVIN, A.B. & LEICK, R.D. Stress concentration in tubular joints. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. 7. *Houston, Texas, 1975. Preprints of seventh annual offshore technology conference.* Dallas, Texas, 1975. 3v. (OTC 2205).
- (8) GIBSTEIN, M.B. Parametrical stress analysis of T-joints. In: SEMINAR OF THE EUROPEAN COAL AND STEEL COMMUNITY FATIGUE. Nov. 1978. *Research programs.* Cambridge, The Welding Institute, 1978.
- (9) GIBSTEIN, M.B. Fatigue failure of T-joints. IN: SEMINAR OF THE EUROPEAN COAL AND STEEL COMMUNITY FATIGUE. Nov. 1978. *Research program.* Cambridge, The Welding Institute, 1978.
- (10) ALVARENGA, Maurício Medeiros de. A estratégia do Brasil face à crise internacional de petróleo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTRUTURAS COSTA AFORA. *Rio de Janeiro*, 1981.
- (11) VISSER, W. On the structural design of tubular joints. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. 6. *Houston, Texas. 1974. Preprints of sixth Annual Offshore Technology Conference.* Dallas, Texas, 1974. 2v. (OTC 2117).

- (12) GRESTE, O. *Finite element analysis of tubular K joints*. Berkeley, CA; Univ. of Calif. Structural Engineering Lab., 1979. 160 p. (Report N. UCESM 70-11).
- (13) NELSON, J.M. A triangulation algorithm for arbitrary planar domains. *Applied Mathematical Modelling*. 2: 151-9, Sept. 1978.
- (14) ELLWANGER, Gilberto Bruno. *Geração automática de dados para estruturas de barras e malhas de elementos finitos*. Porto Alegre, UFRGS. Escola de Engenharia, 1977. 77p. (Tese de Mestrado).
- (15) MACIEL, Vitor Giordani. *Geração automática de dados para projeto e análise de plataformas "offshore"*. Rio de Janeiro, UFRJ. COPPE, Programa de Engenharia Civil, 1982. 208 p. (Tese de Mestrado).
- (16) REIMER, R.B.; LITTON, R.W. & BABCOCK, J.H. Finite element analysis of complex welded tubular joints. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. 11. Houston, Texas, 1979. *Proceedings of the eleventh annual offshore technology conference*. Dallas, Texas, 1979. 4v. (OTC 3377).

- (17) HANS, D.; VISSER, W. & ZUNDERDORP, H.J. *The stress analysis of tubular joints for offshore structures*. Dallas, TX, SPE, 1973. 8 p. (SPE 4342).
- (18) LIAW, C.Y.; LITTON, R.W. & REIMER, R.B. Improved finite elements for analysis of welded tubular joints. In OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. 8. *Houston, Texas, 1976. Proceedings of eighth annual offshore technology conference*. Dallas, Texas, 1976. 3v. p. 267-82 (OTC 2642).
- (19) STRUDL . *Ices Strudl II, Engineering User's Manual*. Vol.1, Frame Analysis. Massachusetts Institute of Technology, 1967, 231 p. (Report R 68-91).

APÊNDICE I

TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS

Para a transformação de um sistema de coordenadas para outro, no que se refere à rotação em torno da origem, tem-se que as coordenadas relacionam-se conforme a equação AI.1 a seguir, para dois sistemas: (U_1, U_2, U_3) e (X_1, X_2, X_3)

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} \quad (\text{eq. AI.1})$$

onde c_{ij} é o co-seno diretor do eixo U_i em relação ao eixo X_j .

O procedimento de geração automática de malhas para juntas tubulares utiliza quatro sistemas de coordenadas, sendo três tridimensionais e um bidimensional.

O sistema global do problema (X, Y, Z) é estabelecido pelo usuário. Tem como única restrição o fato de que o eixo "X" deve coincidir com a linha de centro do tubo principal. A figura AI.1 indica seu posicionamento.

tema global em torno de seu eixo "X". O ângulo de rotação é tal que o eixo "YA" fica contido no plano definido pelas linhas de centro do tubo secundário e do tubo principal. A projeção da linha de centro do tubo secundário sobre o eixo "YA" deve ter o mesmo sentido que o próprio eixo "YA". Consideram-se os tubos secundários orientados da linha de junção para a outra extremidade e que a situação do tubo secundário paralelo ao tubo principal não é possível para juntas tubulares.

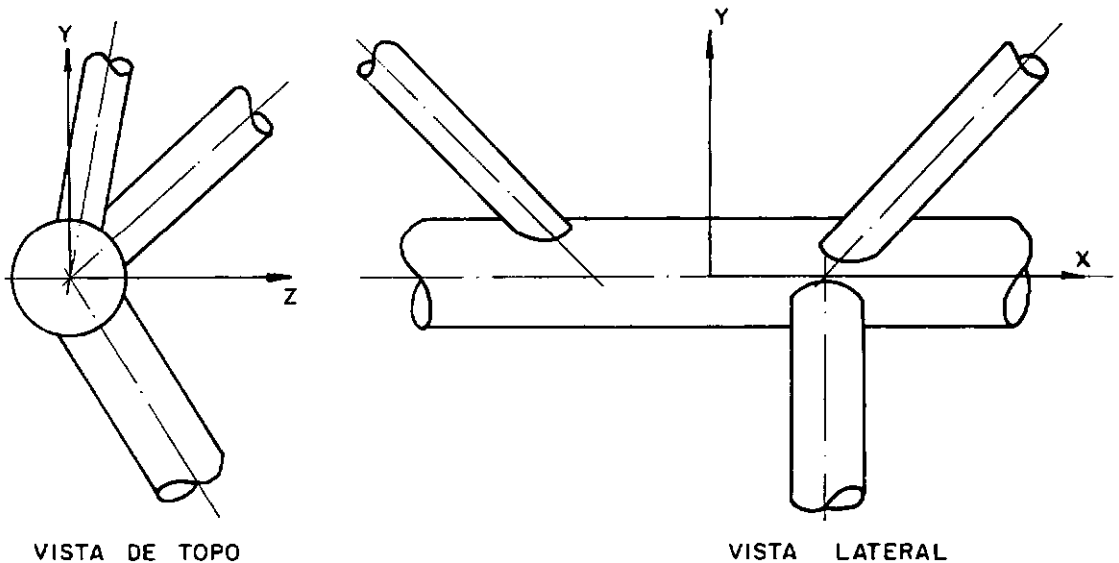


FIG. AI. 1_ SISTEMA GLOBAL

O ângulo de rotação corresponde à denominada coordenada angular do tubo secundário, "CANG", fornecida como dado de entrada à programação. O ângulo de rotação é, portanto, o ângulo entre os eixos "Z" e "YA", medido a partir do eixo "Z", no sentido do eixo "Y", contrário à regra da mão direita.

A figura AI.2 corresponde a uma vista transversal da extreimidade inicial do tubo principal, indicando o ângulo "CANG".

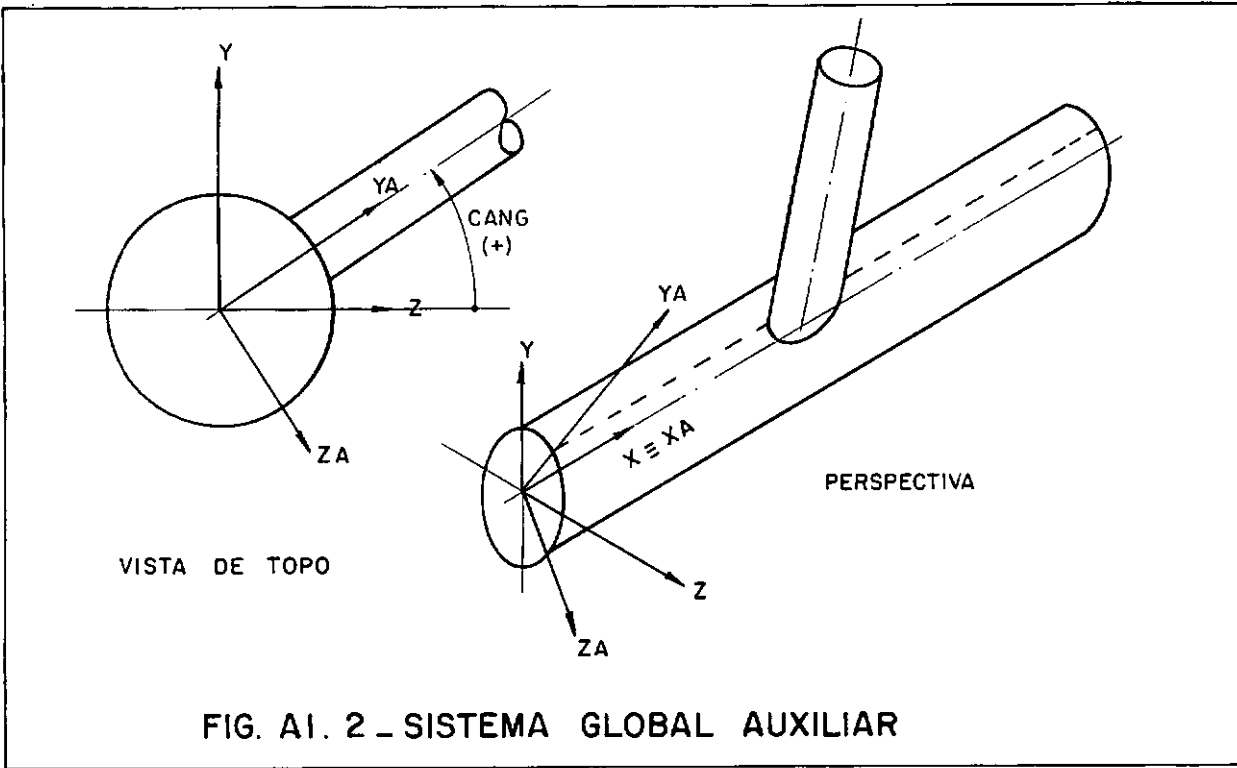


FIG. AI. 2 - SISTEMA GLOBAL AUXILIAR

Para a obtenção das coordenadas no sistema global aux_i

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{SEN}(\text{CANG}) & \text{COS}(\text{CANG}) \\ 0 & -\text{COS}(\text{CANG}) & \text{SEN}(\text{CANG}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{eq. AI.2})$$

Resultando em:

$$X_A = X$$

$$Y_A = Y \text{ SEN}(\text{CANG}) + Z \text{ COS}(\text{CANG}) \quad (\text{eq. AI.3})$$

$$Z_A = -Y \text{ COS}(\text{CANG}) + Z \text{ SEN}(\text{CANG})$$

O sistema seguinte (XT, YT, ZT) é denominado sistema local de cada tubo secundário, sendo também transparente ao usuário. Corresponde a uma rotação e uma translação do sistema global auxiliar. A rotação é feita em torno do eixo "ZA" de modo que o eixo "XT" coincida em direção e sentido com o eixo do tubo secundário. O ângulo de rotação é, portanto, o ângulo do tubo secundário, "ANG", fornecido como dado de entrada. É considerado sempre como positivo, sendo o ângulo do tubo secundário com o sentido positivo do eixo global "X". A translação corresponde a um deslocamento da origem ao longo do eixo "XA", posicionando-a no ponto de interseção do eixo do tubo secundário com o eixo do tubo principal. O deslocamento corresponde à coordenada "CX", dado de entrada que fixa a posição do tubo secundário ao longo do comprimento do tubo principal.

A figura AI.3 corresponde a um corte transversal ao longo da junta tubular no plano contendo os eixos dos tubos principal e secundário.

Utilizando-se novamente a equação AI.1 para a rotação do sistema, tem-se:

$$\begin{bmatrix} XT \\ YT \\ ZT \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(ANG) & \sin(ANG) & 0 \\ -\sin(ANG) & \cos(ANG) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} XA \\ YA \\ ZA \end{bmatrix} \quad (\text{eq. AI.4})$$

Resultando em:

$$\begin{aligned} XT &= XA \cos(ANG) + YA \sin(ANG) \\ YT &= -XA \sin(ANG) + YA \cos(ANG) \\ ZT &= ZA \end{aligned} \quad (\text{eq. AI.5})$$

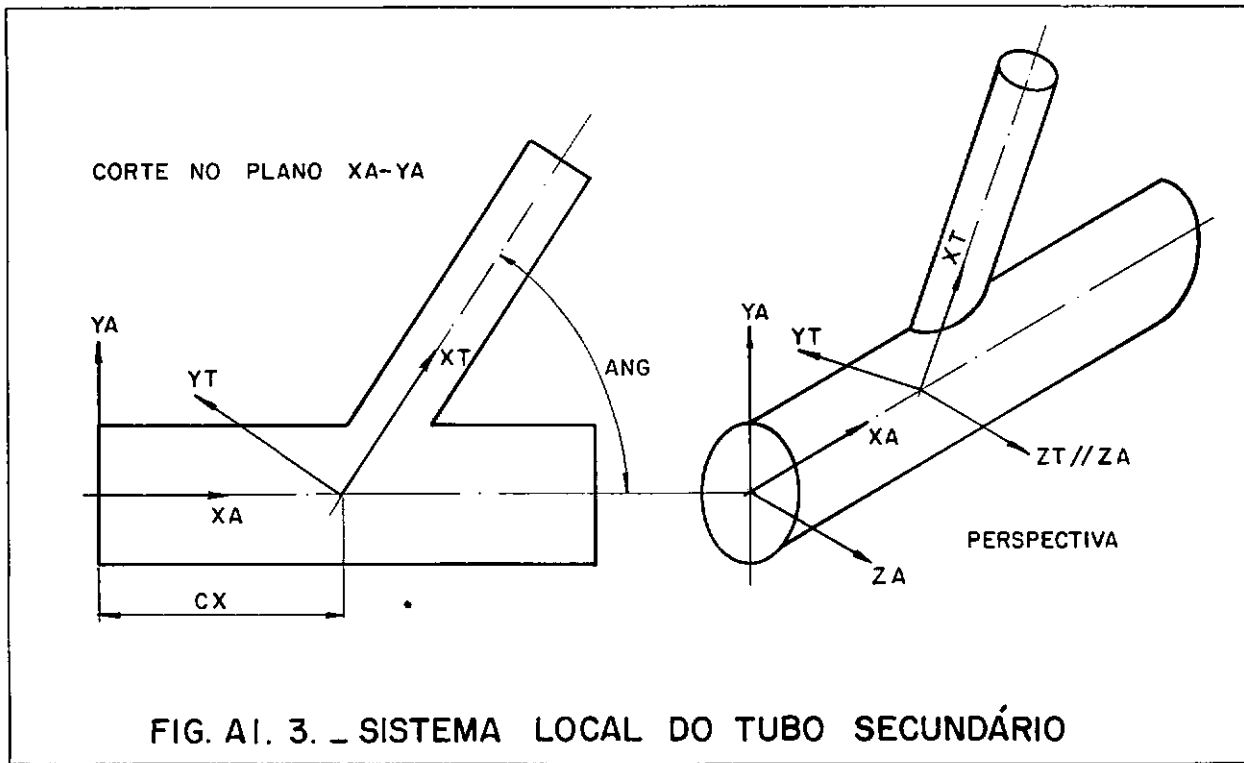


FIG. AI. 3. _ SISTEMA LOCAL DO TUBO SECUNDÁRIO

Considerando-se a translação e corrigindo-se a coordenada "XA", tem-se:

$$XA = XA - CX \quad (\text{eq. AI.6})$$

Levando a equação AI.6 na equação AI.5, vem:

$$\begin{aligned} XT &= (XA - CX) \cos(ANG) + YA \sin(ANG) \\ YT &= -(XA - CX) \sin(ANG) + YA \cos(ANG) \\ ZT &= ZA \end{aligned} \quad (\text{eq. AI.7})$$

O último sistema utilizado pelo procedimento é o único bidimensional. É o sistema (x, y) da superfície desenvolvida de cada tubo. É importante para a interpretação das plots, pois fixa a geratriz de abertura das superfícies dos tubos. O eixo "x" coincide em direção e sentido com o eixo do tubo, correspondendo a uma reta geratriz. A geratriz de abertura

tura é diametralmente oposta ao eixo "x". O eixo "y" é tangente à seção transversal circular do tubo, tendo a mesma direção e sentido que o eixo "Y", no caso do tubo principal, ou que o eixo "YT", quando do tubo secundário. A origem do sistema está localizada na superfície dos tubos, no ponto de coordenadas $(X, Y, Z) = (0, 0, R)$, no caso do tubo principal, sendo "R" o seu raio, e no ponto de coordenadas $(X_T, Y_T, Z_T) = (0, 0, r)$, para os tubos secundários, sendo "r" o seu raio.

A figura AI.4 indica o posicionamento do sistema para o tubo principal, sendo análogo para os secundários.

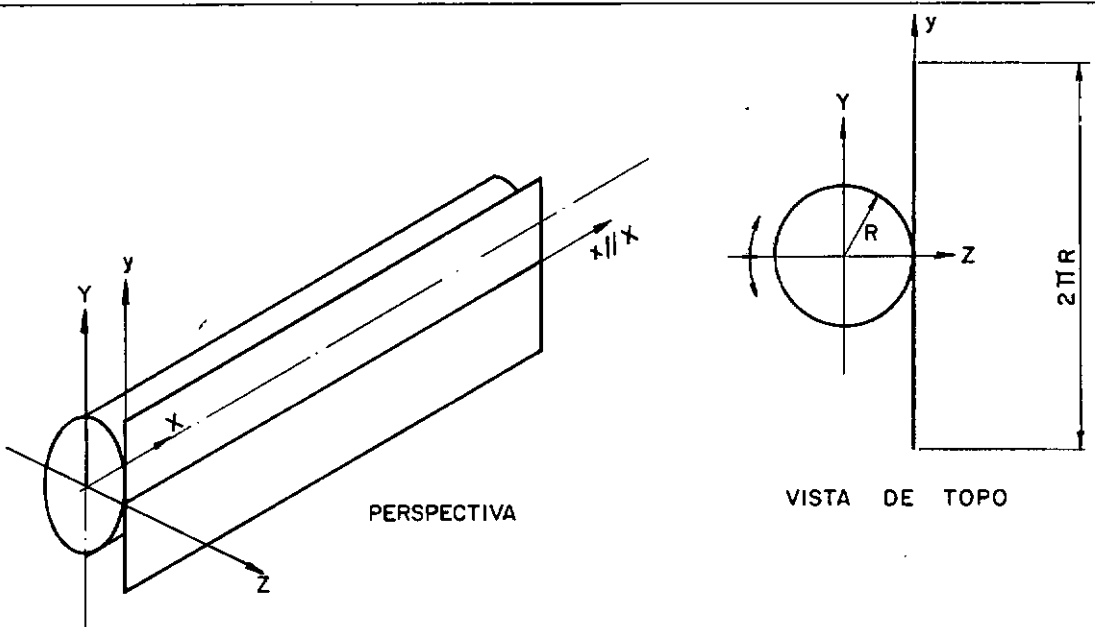


FIG. AI. 4 _ SISTEMA DA SUPERFÍCIE DESENVOLVIDA

A coordenada "x" coincide com a coordenada "X" do sistema global, e a coordenada "y" corresponde ao arco de círculo medido a partir do eixo "Z" no sentido do eixo "Y", contrário, portanto, à regra da mão direita.

Assim, têm-se as equações AI.8, sendo "R" o raio do tubo.

$$\begin{aligned} x &= X \\ y &= R \cdot \text{arc tg } (Y/Z) \end{aligned} \quad (\text{eq. AI.8})$$

De acordo com a seqüência de operações da programação da geração automática, os pontos de interseção são determinados no sistema global, passando em seguida para o sistema da superfície desenvolvida do tubo principal, onde é feita a geração dos pontos, triangularização, plotagem e regularização, retornando ao sistema global para saída das coordenadas dos pontos da malha.

Para cada tubo secundário os pontos de interseção da correspondente linha de junção são transformados do sistema da superfície desenvolvida do tubo principal para o sistema global e, seguindo a seqüência abordada, são transformados para o sistema local da superfície desenvolvida do tubo secundário em questão. Após a geração, retorna-se ao sistema global através de transformações no sentido inverso ao apresentado e cujas deduções são análogas.

APENDICE II

DETERMINAÇÃO DAS INTERSEÇÕES

Os pontos de interseção são determinados inicialmente no sistema global auxiliar do tubo secundário sob consideração, (X_A, Y_A, Z_A) . É utilizado também o sistema local do tubo, (X_T, Y_T, Z_T) . Apenas para facilidade de visualização, tem-se ainda o sistema (u, v, w) . Este sistema corresponde ao sistema local, transladado de um valor qualquer ao longo da linha de centro do tubo, ou seja, ao longo do eixo "XT". A figura AII.1 ilustra o posicionamento e o processo.

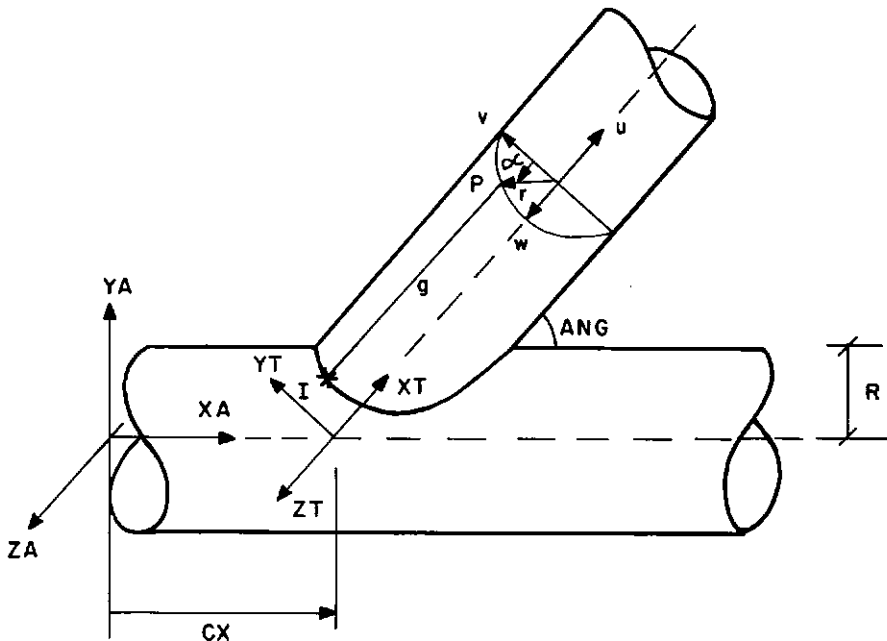


FIG. AII.1 – DETERMINAÇÃO DA LINHA DE JUNÇÃO

Basicamente cada ponto da linha de junção, ponto "I", denominado ponto de interseção, é estabelecido determinando-se a interseção de uma reta geratriz "g" do tubo secundário com a superfície do tubo principal. A linha de junção é definida através de uma série de pontos de interseção.

Para a fixação de cada geratriz tem-se na seção transversal do tubo secundário o raio "r" que define o ponto "P" na superfície do tubo. Cada geratriz considerada é uma reta paralela ao eixo do tubo passando por "P". A posição de "r" é estabelecida através do ângulo " α ", medido a partir de "v" na direção de "w", conforme a regra da mão direita. Variando-se, portanto, o ângulo " α ", as diversas geratrizes são consideradas, estabelecendo os respectivos pontos de interseção com o tubo principal.

Considera-se a seguir a determinação das coordenadas de um ponto de interseção, "I".

Tem-se o ponto "P" de coordenadas (u_1, v_1, w_1) , estabelecido pelo raio "r" e pelo ângulo " α ". Expressando as coordenadas de "P" em função de "r" e " α ", vem:

$$u_1 = 0$$

$$v_1 = r \cos \alpha \quad (\text{eq. AII.1})$$

$$w_1 = r \sin \alpha$$

Como a translação do sistema (u, v, w) ao longo do eixo "XT" é qualquer, uma posição válida corresponde a zero de transla

ção, coincidindo com o sistema (X_T, Y_T, Z_T) . Assim, tem-se para o ponto $P=(X_{T_1}, Y_{T_1}, Z_{T_1})$:

$$X_{T_1} = 0$$

$$Y_{T_1} = r \cos \alpha \quad (\text{eq. AII.2})$$

$$Z_{T_1} = r \sin \alpha$$

Considerando-se a rotação do sistema local do tubo, (X_T, Y_T, Z_T) , em relação ao sistema global auxiliar, (X_A, Y_A, Z_A) , tem-se, de modo análogo ao abordado no apêndice I, para dois sistemas (V_1, V_2, V_3) e (X_1, X_2, X_3) :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} \quad (\text{eq. AII.3})$$

Sendo c_{ij} o co-seno diretor do eixo V_i em relação ao eixo X_j .

Sendo "ANG" o ângulo de rotação entre os sistemas, conforme indicado na figura AII.1, tem-se pela equação AII.3:

$$\begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\text{ANG}) & -\sin(\text{ANG}) & 0 \\ \sin(\text{ANG}) & \cos(\text{ANG}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} \quad (\text{eq. AII.4})$$

Efetuando, resulta:

$$X_A = X_T \cos(\text{ANG}) - Y_T \sin(\text{ANG})$$

$$YA = XT \text{ SEN}(\text{ANG}) + YT \text{ COS}(\text{ANG}) \quad (\text{eq. AII.5})$$

$$ZA = ZT$$

Considerando-se a translação de valor "CX", conforme a figura AII.1, do sistema (XT, YT, ZT) em relação ao sistema (XA, YA, ZA) ao longo do eixo "XA", tem-se:

$$XA = XT \text{ COS}(\text{ANG}) - YT \text{ SEN}(\text{ANG}) + CX$$

$$YA = XT \text{ SEN}(\text{ANG}) + YT \text{ COS}(\text{ANG}) \quad (\text{eq. AII.6})$$

$$ZA = ZT$$

Levando-se as equações AII.2 nas equações AII.6, tem-se para o ponto $P = (XA_1, YA_1, ZA_1)$:

$$XA_1 = -r \text{ COS } \alpha \text{ SEN}(\text{ANG}) + CX$$

$$YA_1 = r \text{ COS } \alpha \text{ COS}(\text{ANG}) \quad (\text{eq. AII.7})$$

$$ZA_1 = r \text{ SEN } \alpha$$

Estabelecendo-se a equação da reta geratriz "g" do tubo secundário, tem-se que num sistema (x, y, z) a equação de uma reta passando por um ponto $Q = (x_1, y_1, z_1)$ e paralela a uma reta "t" é:

$$(x - x_1)/\ell = (y - y_1)/m = (z - z_1)/n \quad (\text{eq. AII.8})$$

Os co-senos diretores da reta "t" em relação aos eixos "x", "y" e "z", são respectivamente, "l", "m" e "n".

Considerando-se a reta geratriz "g", ela é paralela ao

eixo "XT", cujos co-senos diretores no sistema (XA, YA, ZA) são, conforme a figura AII.1:

$$\ell = \cos(\text{ANG})$$

$$m = \sin(\text{ANG}) \quad (\text{eq. AII.9})$$

$$n = 0$$

Através das equações AII.8 e AII.9, tem-se para a equação da reta "g", passando por $P = (XA_1, YA_1, ZA_1)$ e paralela ao eixo "XT":

$$(XA - XA_1)/\ell = (YA - YA_1)/m = (ZA - ZA_1)/n \quad (\text{eq. AII.10})$$

A equação do cilindro correspondente ao tubo principal é:

$$(YA)^2 + (ZA)^2 = R^2 \quad (\text{eq. AII.11})$$

sendo "R" o raio do tubo principal.

O ponto da linha de junção procurado corresponde ao ponto de interseção da reta "g" com o tubo principal. É determinado através do sistema composto pelas equações AII.10 e AII.11. Resolvendo, tem-se:

$$ZA = (XA - XA_1) (n/\ell) + ZA_1$$

$$YA = \pm (R^2 - ZA^2)^{1/2} \quad (\text{eq. AII.12})$$

$$XA = (YA - YA_1) (\ell/m) + XA_1$$

Levando-se as equações AII.7 e AII.9 nas equações AII.12 e considerando-se ainda que a coordenada "YA" negativa não tem significado físico para o problema, tem-se finalmente pa

ra o ponto de interseção $I = (X_A, Y_A, Z_A)$:

$$Z_A = r \text{ SEN } \alpha$$

$$Y_A = (R^2 - Z_A^2)^{1/2} \quad (\text{eq. AII.13})$$

$$X_A = ((Y_A \text{ COS}(\text{ANG}) - r \text{ COS } \alpha) / \text{SEN}(\text{ANG})) + C_X$$

A mudança das coordenadas do ponto "I" para o sistema global e daí para o sistema da superfície desenvolvida do tubo principal são etapas que antecedem o início da geração dos pontos da malha, não apresentando maiores dificuldades, conforme abordado no apêndice I.

Os demais pontos da linha de junção são estabelecidos incrementando-se o valor do ângulo " α ". O processo prossegue até o ângulo de 180° , sendo os demais pontos determinados considerando-se a simetria existente no sistema global auxiliar para a linha de junção em relação ao plano $(X_A - Y_A)$.

O procedimento de geração dos pontos da malha requer que os pontos de interseção estejam aproximadamente equidistantes, com um espaçamento próximo do valor especificado pelo usuário. Como não é possível estabelecer uma relação entre o ângulo " α " e o espaçamento dos pontos de interseção, torna-se necessário o processo iterativo descrito no capítulo III.